



BACHELORARBEIT

Herr
Andre Feldhaus

**Wirtschaftlichkeitsanalyse an
ausgewählten Anschlussvarianten
im Stahlbau**

Mittweida, 2014

BACHELORARBEIT

Wirtschaftlichkeitsanalyse an ausgewählten Anschlussvarianten im Stahlbau

Autor:

Herr

Andre Feldhaus

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM10w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing Torsten Laufs

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing Peter Hübner

Einreichung:

Mittweida, 27.11.2014

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2014

Bibliographische Beschreibung:

Feldhaus, Andre:

Wirtschaftlichkeitsanalyse an ausgewählten Anschlussvarianten im Stahlbau – 2014. – 113S. –

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau/ Feinwerktechnik, Bachelorarbeit, 2014

Referat:

Für den wirtschaftlichen Erfolg eines Stahlbauunternehmens ist eine genaue Kenntnis der Fertigungskosten unentbehrlich. Sie bildet die Grundlage für die geforderte Vergütung erbrachter Leistungen. Eine Verringerung des Kostenaufwands in der Fertigung steigert die Konkurrenzfähigkeit des Unternehmens gegenüber seinen Wettbewerbern.

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Konstruktionsdetails in verschiedenen Varianten nach der gültigen Norm, dem Eurocode 3, nachgewiesen und deren Herstellungskosten ermittelt. Ziel ist dabei, durch eine gezielte Auswahl von Konstruktionsvarianten, Kosten in der Fertigung einzusparen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Allgemein.....	1
1.2 Zielstellung.....	1
1.3 Abgrenzungen.....	2
2 Theoretische Vorbetrachtung.....	3
2.1 Einleitung.....	3
2.2 Nachweisschema nach Eurocode 3.....	4
2.2.1 Nachweis eines Profilquerschnitts nach DIN EN 1993-1-1: 2010(D).....	4
2.2.2 Nachweisschema für Schraubenverbindungen mit Längs- und Querkraften und Stahlsorten nach EN 1993-1-8:2010 (D).....	8
2.2.3 Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach EN 1993-1-8:2010, 4 (D).....	13
2.2.4 Nachweisschema für steifenlose T-Anschlüsse an Flansche nach DIN EN 1993-1-8 4.10 (D).....	17
2.2.5 Ermittlung der Schraubenkräfte mittels des IP-Verfahrens.....	18
2.3 Wirtschaftliche Betrachtung.....	19
2.3.1 Materialpreise.....	19
2.3.2 Fertigungszeiten.....	19
2.3.2.1 Allgemeines.....	19
2.3.2.2 Fertigungsablauf, Zeiteinteilung und Losgröße.....	20
2.3.2.3 Bohr-Säge-Automat.....	21
2.3.2.4 Bandsäge und Stanze.....	22
2.3.2.5 Plasmaschneidanlage.....	24
2.3.2.6 Zusammenbau.....	26
2.3.2.7 Schweißplatz.....	26
2.3.2.8 Montage.....	27
2.3.3 Betriebskosten.....	28
3 Variantenuntersuchung von Anschlüssen.....	29
3.1 Allgemein.....	29
3.2 Rahmenbedingungen.....	30
3.3 Vorgehensweise.....	33
3.4 Berechnung der Anschlüsse.....	35

3.4.1	Anmerkung zur Berechnung der Detailvarianten nach Eurocode 3	35
3.4.2	Nachweisschema für Detail Druckrohr, Variante 1	35
3.4.3	Nachweisschema für Detail Druckrohr, Variante 2 und 3	36
3.4.4	Nachweisschema für Detail Fachwerk, Variante 1	36
3.4.5	Nachweisschema für Detail Fachwerk, Variante 2	38
3.4.6	Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 1	39
3.4.7	Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 2	39
3.4.8	Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 3	40
3.5	Kostenermittlung	41
3.5.1	Berechnung der Materialkosten	41
3.5.2	Fertigungskosten	42
3.5.3	Gesamtkosten	43
3.6	Rechnungsbeispiele	44
3.6.1	Nachweis der Anschlüsse und Berechnung geometrischer Größen	44
3.6.1.1	Rechnungsbeispiel 1) Druckrohr; Detail 1; $F_{Ed}=180\text{ N}$	44
3.6.1.2	Rechnungsbeispiel 2) Druckrohr; Detail 2; $F_{Ed}=180\text{ kN}$; Blech aus S355	47
3.6.1.3	Rechnungsbeispiel 3) Druckrohr; Detail 3; $F_{Ed}=140\text{ kN}$; Blech aus S235	51
3.6.1.4	Rechnungsbeispiel 4) Fachwerkknoten; Detail 1	54
3.6.1.5	Rechnungsbeispiel 5) Fachwerkknoten; Detail 2	63
3.6.1.6	Rechnungsbeispiel 6) Querkraftanschluss; Detail 1; $V_{Ed}=150\text{ kN}$	72
3.6.1.7	Rechnungsbeispiel 7) Querkraftanschluss; Detail 2; $V_{Ed}=150\text{ kN}$	77
3.6.1.8	Rechnungsbeispiel 8) Querkraftanschluss; Detail 3; $V_{Ed}=150\text{ kN}$	82
3.6.2	Ermittlung der Fertigungskosten	86
3.6.2.1	Rechnungsbeispiel 9) Druckrohr; Detail 1; $F_{Ed}=180\text{ N}$	86
3.6.2.2	Rechnungsbeispiel 10) Druckrohr; Detail 2; $F_{Ed}=180\text{ N}$; Blech aus S355	87
3.6.2.3	Rechnungsbeispiel 11) Druckrohr; Detail 3; $F_{Ed}=140\text{ N}$; Blech aus S235	89
3.6.2.4	Rechnungsbeispiel 12) Fachwerkknoten	91
3.6.2.5	Rechnungsbeispiel 13) Querkraftanschluss; Detail 1; $V_{Ed}=150\text{ N}$	92
3.6.2.6	Rechnungsbeispiel 14) Querkraftanschluss; Detail 2; $V_{Ed}=150\text{ N}$	93
4	Übersicht der Varianten	96
4.1	Geometrische Größen der untersuchten Varianten	96
4.2	Kostenermittlung der untersuchten Varianten	99
5	Vergleich der Varianten	102
5.1	Vorgehensweise	102

5.2	Einschätzung der Aussagefähigkeit.....	102
5.3	Druckrohranschluss.....	103
5.4	Fachwerkknoten	104
5.5	Querkraftanschluss	105
6	Zusammenfassung	106
7	Anhang	108
8	Normverzeichnis	113
9	Literaturverzeichnis	113
10	Selbstständigkeitserklärung.....	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 1 von 4	4
Abbildung 2: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 2 von 4	5
Abbildung 3: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 3 von 4	6
Abbildung 4: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 4 von 4	7
Abbildung 5: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 1 von 5	8
Abbildung 6: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 2 von 5	9
Abbildung 7: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 3 von 5	10
Abbildung 8: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 4 von 5	11
Abbildung 9: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 5 von 5	12
Abbildung 10: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 1 von 4	13
Abbildung 11: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 2 von 4	14
Abbildung 12: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 3 von 4	15
Abbildung 13: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 4 von 4	16
Abbildung 14: Nachweisschema für steifenlose T-Anschlüsse nach Eurocode	17
Abbildung 15: IP-Verfahren	18
Abbildung 16: Produktionsstufen im Stahlbau	20
Abbildung 17: Bohr-Säge-Automat	22
Abbildung 18: Bandsäge	23
Abbildung 19: Schachtelung einer 2000 x 3000 mm Tafel	24
Abbildung 20: Plasmaschneidanlage	25
Abbildung 21: Verlauf der Kräfte der verschiedenen Anschlussdetails	30
Abbildung 22: Übersicht der Rahmenbedingungen	31
Abbildung 23: Darstellung der Konstruktionsvarianten der Anschlussdetails	32
Abbildung 24: Ablauf der Gesamtkostenermittlung	34
Abbildung 25: Nachweisschema Druckrohr: T-Profil	35
Abbildung 26: Nachweisschema Druckrohr: Konturblech; Geschlitztes Rohr	36
Abbildung 27: Nachweisschema Fachwerk: S1 indirekt; S2 direkt angeschlossen	37
Abbildung 28: Nachweisschema Fachwerk: S1; S2 indirekt angeschlossen	38
Abbildung 29: Nachweisschema Querkraft: Doppelwinkel	39
Abbildung 30: Nachweisschema Querkraft: Fahnenblech	40
Abbildung 31: Nachweisschema Querkraft: Stirnplatte	40
Abbildung 32: Abmessungen des Rechnungsbeispiels 1	44
Abbildung 33: Abmessungen Konturblech	49
Abbildung 34: mögliche Risslinien im Konturblech	50
Abbildung 35: Lochabmessungen des Konturblechs	52
Abbildung 36: Lage möglicher Risslinien	53
Abbildung 37: Abmessungen des Knotenblechs	55
Abbildung 38: Risslinie unter 30° Lasteinleitung	55
Abbildung 39: Verlauf der Schnitte A-A und B-B	57
Abbildung 40: Abmessungen im Schnitt B-B	60
Abbildung 41: Profillängen zur Volumenberechnung	63
Abbildung 42: Abmessungen des Knotenblechs	64
Abbildung 43: Lage der Schnitte A-A; B-B und C-C	67
Abbildung 44: Profillängen zur Volumenberechnung	72

Abbildung 45: Abmessungen des Doppelwinkelanschlusses	73
Abbildung 46: Abmessungen des Fahnenblechanschlusses	78
Abbildung 47: Abmessungen des Stirnplattenanschlusses	83
Abbildung 48: Vergleich der Fertigungskosten des Details Druckrohr	103
Abbildung 49: Vergleich der Fertigungskosten des Details Fachwerkknoten	104
Abbildung 50: Knicklängenbeiwerte nach Euler	104
Abbildung 51: Vergleich der Fertigungskosten des Details Querkraftanschluss	105
Abbildung 53: Problem beim „Hineindrehen“ eines Trägers	105
Abbildung 52: Toleranzsummierung durch fehlende Ausgleichsmöglichkeiten	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialpreise.....	19
Tabelle 2: Übersicht der Fertigungszeiten	20
Tabelle 3: Losgrößen der untersuchten Anschlussdetails.....	21
Tabelle 4: Parameter des Bohr-Säge-Automaten	22
Tabelle 5: Parameter der Bandsäge und der Standbohrmaschine	23
Tabelle 6: Verschnittfaktoren ausgewählter Blechgeometrien	24
Tabelle 7: Parameter der Plasmaschneidanlage	25
Tabelle 8: Zeiten des Zusammenbauplatzes	26
Tabelle 9: Nahtdicke und Schweißgeschwindigkeit	27
Tabelle 10: Aufschlagsfaktor des Nahtvolumens in Abhängigkeit der Nahtdicke	27
Tabelle 11: Zeiten des Schweißplatzes.....	27
Tabelle 12: Betrachtete Montagezeiten	28
Tabelle 13: Betriebskosten der Produktionsstufen.....	28
Tabelle 14: Varianten des Details Druckrohr	33
Tabelle 15: Varianten des Details Fachwerkknoten.....	33
Tabelle 16: Varianten des Details Querkraftanschluss.....	34
Tabelle 17: Betrachteter Bereich zur Volumenberechnung der Profile.....	41
Tabelle 18: Übersicht der Varianten des Details Druckrohranschluss	96
Tabelle 19: Übersicht der Varianten des Details Fachwerkknoten	97
Tabelle 20: Übersicht der Varianten des Details Querkraftanschluss.....	98
Tabelle 21: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Druckrohranschluss	99
Tabelle 22: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Fachwerkknoten	100
Tabelle 23: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Querkraftanschluss.....	101

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Im Stahlhochbau gibt es grundsätzlich drei verschiedene Kategorien von Bauelementen, die zur Anwendung kommen: flächen-, linien- und punktförmige Elemente. Zu den Flächenelementen zählen die Hülllemente, wie beispielsweise Trapezbleche, Wandkassetten und Paneele. Profile und Seile zählen zu den linienförmigen Elementen. Punktförmige Bauelemente haben gegenüber den anderen Elementen eine sehr geringe Ausdehnung. Zu dieser Kategorie beinhaltet Anschlüsse, Montagehilfen und lokale Verstärkungen. Diese Kategorien spiegeln sich auch in den Auftragsbeschreibungen der Auftraggeber wieder. Flächige und teilweise auch linienförmige Elemente werden üblicherweise in ihren Eigenschaften vorgegeben, wie beispielsweise die Dicke der Dämmschicht oder maximal mögliche, einbaubare Profilhöhe. Dem gegenüber bestehen bei punktförmigen Elementen keine Einschränkungen an deren Ausbildung.

Im Stahlbau werden Anschlüsse verwendet, um Kräfte zwischen verschiedenen Bauelementen (flächen- oder linienförmig) zu übertragen. Dabei findet eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten Anwendung. Der Hersteller hat die Anschlüsse so zu Dimensionieren, dass keine Gefahr für Menschen oder Sachwerte entsteht. Daraus ergibt sich, dass die wichtigste Variable für den Hersteller die Haltbarkeit der Konstruktion ist. Die Auslegung der Konstruktion hat so zu erfolgen, dass die geforderten Einwirkungen und zu erwartende Umwelteinflüsse (wie beispielsweise Wind, Schneelasten oder Erdbeben) während des gesamten Einsatzzeitraumes, bei entsprechender Instandhaltung, standgehalten werden und keine Einschränkungen der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit eintreten.

Die Auswahl einer Anschlussvariante wird von mehreren Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise die zu verbindenden Profile, die Art und Größenordnung der zu übertragenden Kräfte, der vorhandene Werkstoff, die Qualifikation des herstellenden Betriebes oder die Einsatzatmosphäre. Auch nach der Selektion verbleiben mehrere Varianten, gegen die aus konstruktiver Sicht keine Beanstandungen vorliegen, aus denen der Hersteller wählen kann.

1.2 Zielstellung

In der Regel besteht im Stahlbau kein Anspruch in Bezug auf optische oder ästhetische Aspekte. Im Fokus des Auftraggebers stehen vielmehr Maschinen oder Anlagen, bei denen die Stahlkonstruktion als notwendige Unterkonstruktion dient. Die Konstruktion hat nicht nur die geforderte Aufgabe zu übernehmen, sondern ist mit dem geringsten Kostenaufwand zu realisieren. Damit kommt zu den statisch-konstruktiven Aspekten der Preis als ausschlaggebendes Kriterium hinzu. Während die Lage der Träger teilweise von der baulichen Situation vorgegeben wird, obliegt die Auswahl und Dimensionierung der Anschlüsse fast ausschließlich dem Hersteller. Der Auftraggeber führt eine Ausschreibung durch, die alle für ihn wichtigen technischen Merkmale beinhaltet. An der Ausschreibung nehmen mehrere Stahlbauunternehmen teil, die jeweils ein Angebot einreichen. Dabei hat das Angebot mit dem niedrigsten realistischen Kostenaufwand die höchsten Chancen auf die Vergabe des Auftrags. Um die Konkurrenzfähigkeit zu erhöhen sind die Hersteller stetig bemüht kostengünstiger zu produzieren.

Ziel dieser Arbeit ist es die Kosten ausgewählter Stahlbauanschlüsse zu berechnen und diese auf ihre Wirtschaftlichkeit zu untersuchen. Dies beinhaltet die Einschätzung über die Aussagefähigkeit der ermittelten Ergebnisse, wie auch die Analyse auffälliger Einflüsse auf die Gesamtkosten. Die ermittelten Fertigungskosten ermöglichen dem herstellenden Betrieb eine realitätsnahe Kalkulation aufzustellen und dient als Grundlage der Auftragsvergütung. Daraus lässt sich ableiten, dass der wirtschaftliche Erfolg des Betriebes aus der Kenntnis der zu erwartenden Fertigungskosten und deren Verringerung besteht.

1.3 Abgrenzungen

Die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Anschlussvarianten ist zu großen Teilen abhängig von den Produktionsmöglichkeiten des herstellenden Betriebes. Durch das Vorhandensein von Spezialmaschinen oder -anlagen können aufwendige Varianten kostengünstig produziert werden. In dieser Arbeit wird die Fertigung anhand des Beispiels der Firma „Stahlbau Lüttewitz GmbH“ vorgenommen. Dabei werden die Produktionsschritte mit - in mittleren bis mittelgroßen Stahlbauunternehmen - üblicher Gerätetechnik vollzogen. Dies umfasst unter anderen Bohr-Säge-Automaten, Bandsägen, Plasmaschneidanlage und Hallenkräne. Dabei kommen in ähnlichen Unternehmen auch andere als die Genannten zum Einsatz, führen jedoch im Wesentlichen eine ähnliche Funktion aus. Unterschiede in den Fertigungskosten stellen sich auch in verschiedenen Betrieben mit ähnlicher Maschinenteknik aufgrund unterschiedlicher Fertigungsparameter, wie beispielsweise Betriebskosten, Bearbeitungszeiten oder die Aufteilung der Halle und der daraus resultierenden Änderung der Laufwege heraus. Ferner haben Änderungen des Fertigungsprozesses, der Anlagen oder der räumlichen Gestaltung des Betriebs Auswirkungen auf die Fertigungskosten.

Aus den genannten Gründen ist dieser Analyse keine allgemein gültige Aussage zu entnehmen, sondern vielmehr eine spezielle, auf den betrachteten Betrieb mit der betrachteten Fertigung zugeschnittene Lösung. Eine Übertragung der Ergebnisse auf einen ähnlichen Fertigungsaufbau ist nur sehr bedingt möglich.

2 Theoretische Vorbetrachtung

2.1 Einleitung

Die Untersuchung unterschiedlicher Varianten setzt eine Vorbetrachtung der verwendeten Norm und den wirtschaftlichen Aspekten voraus.

Der Nachweis der in dieser Arbeit zu untersuchenden Anschlüsse findet nach dem Eurocode statt.

„Das Eurocode-Programm umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung;

EN 1991, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke;

EN 1992, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauten;

EN 1993, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten;

EN 1994, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten;

EN 1995, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten;

EN 1996, Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten;

EN 1997, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik;

EN 1998, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben;

EN 1999, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumkonstruktionen.“¹

Für die Bemessung von Anschlüssen werden die Normen DIN EN 1993-1-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“ und DIN EN 1993-1-8 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen“ angewandt. Die Anwendung dieser Normen ist in Deutschland nur in Verbindung mit dem entsprechenden Nationalen Anhang (NA) zulässig².

Abschnitt 2.2 enthält technische Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen. In den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 werden Nachweisschemen basieren auf dem Eurocode 3 dargestellt und im Abschnitt 2.2.5 ist die statische Ermittlung von Schraubenkräften nach dem IP-Verfahren aufgezeigt.

Der Abschnitt 2.3 zeigt die wirtschaftlichen Aspekte auf. Eingegangen wird auf den Bereichen Materialpreise (Abschnitt 2.3.1), Fertigungszeiten (Abschnitt 2.3.2) und Betriebskosten (Abschnitt 2.3.2). Die Betrachtung der Fertigungszeiten beinhaltet eine Übersicht und Beschreibung des Fertigungsablaufes mit der entsprechenden Maschinentechnik.

¹ DIN EN 1993-1-1 S.4f

² vgl. DIN EN 1993-1-1 Nationales Vorwort

2.2 Nachweisschema nach Eurocode 3

2.2.1 Nachweis eines Profilquerschnitts nach DIN EN 1993-1-1: 2010(D)

Das Nachweisschema für die Querschnittsklassen 1 und 2 auf Normalspannung, einachsiger Querkraft und Biegung ist in den Abbildungen 1 bis 4 dargestellt.

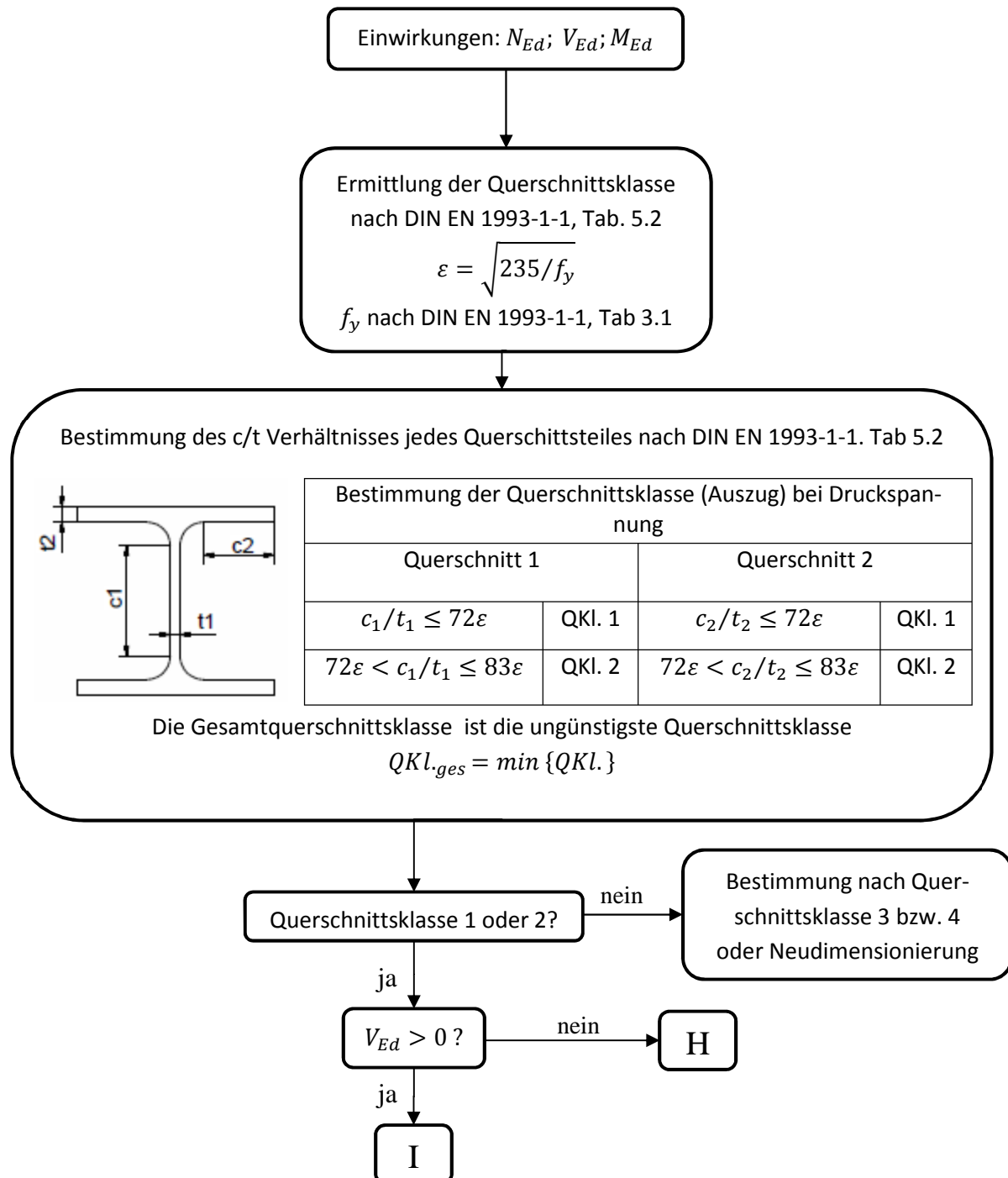


Abbildung 1: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 1 von 4

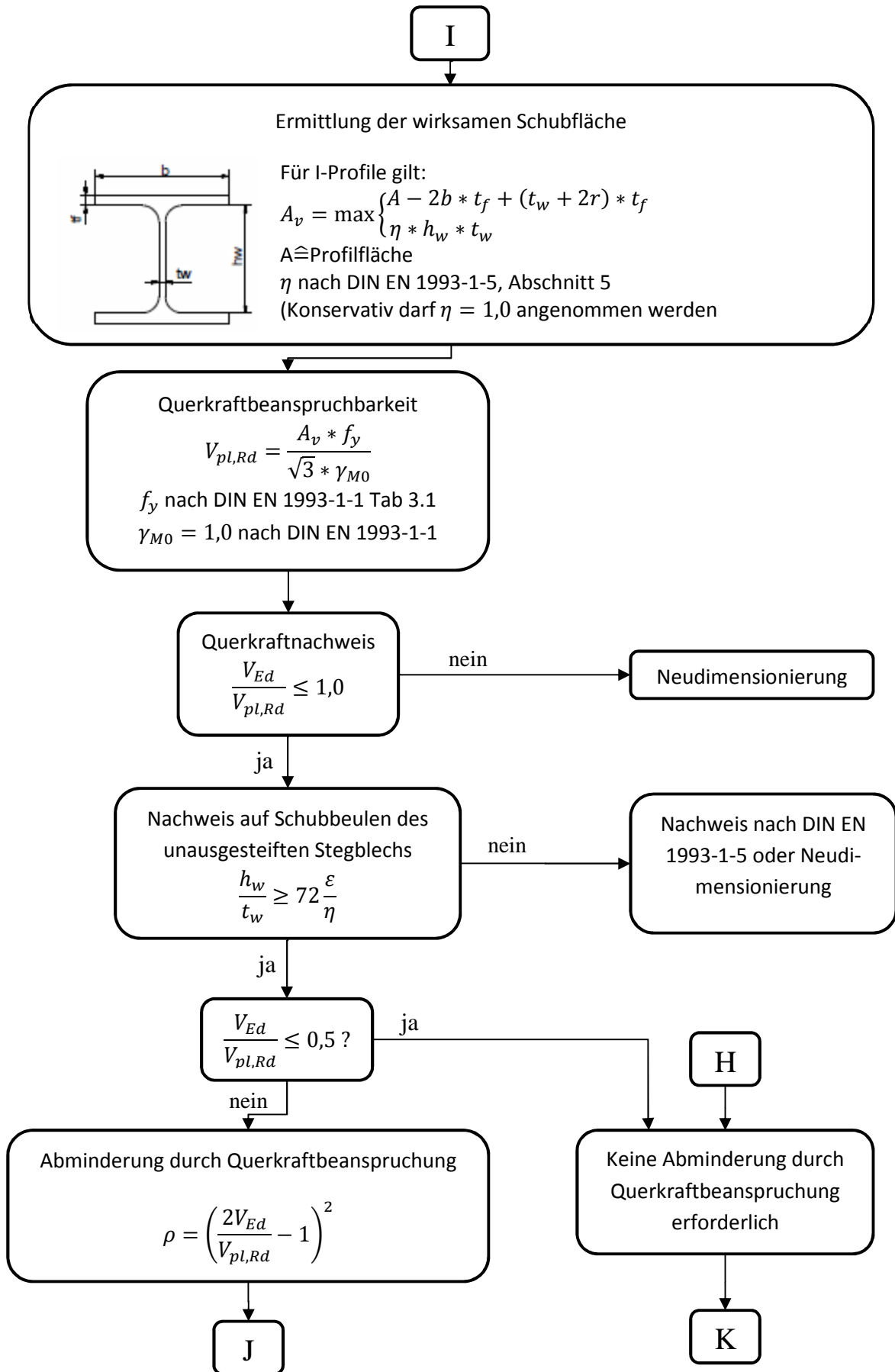


Abbildung 2: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 2 von 4

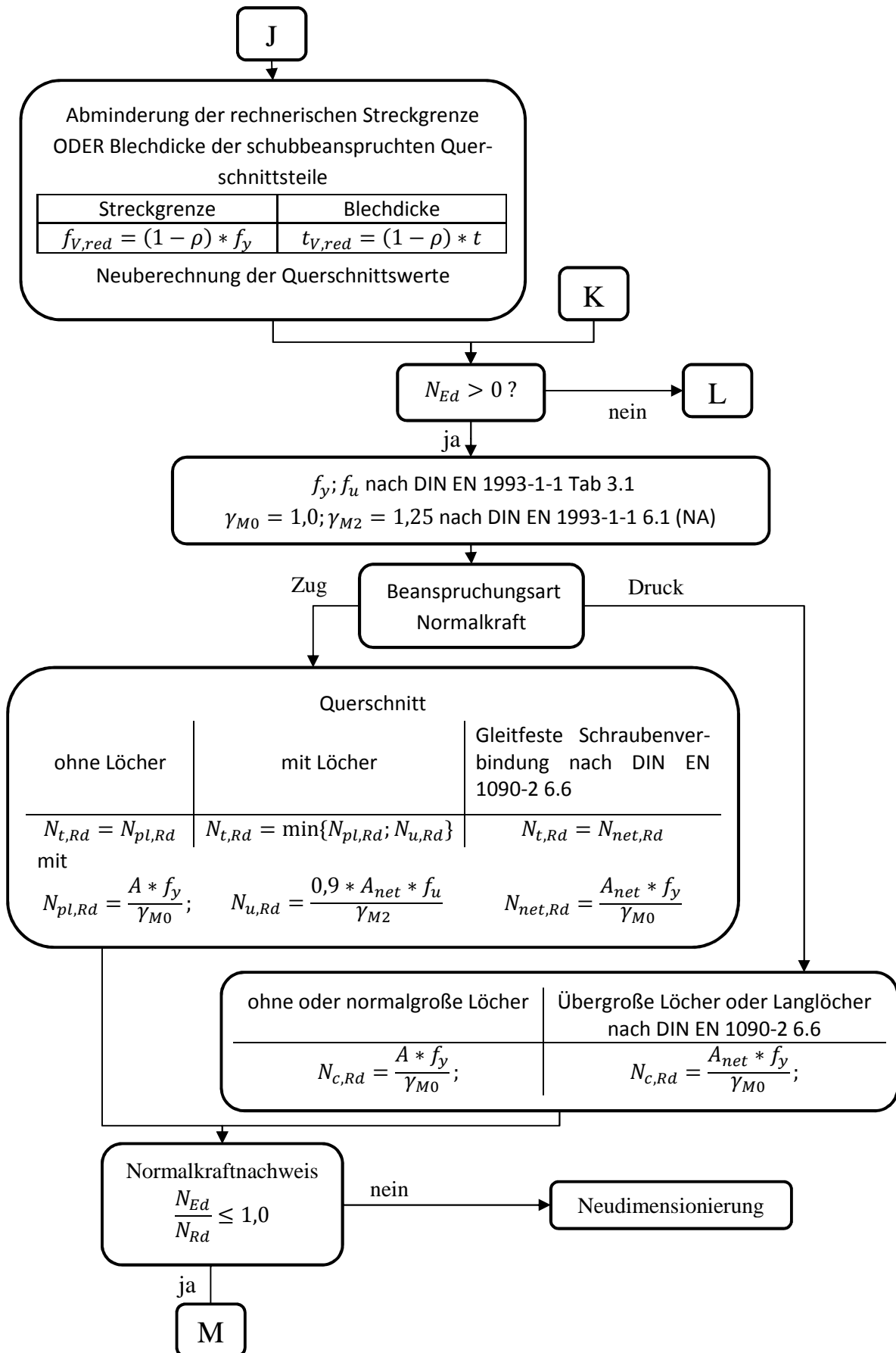


Abbildung 3: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 3 von 4

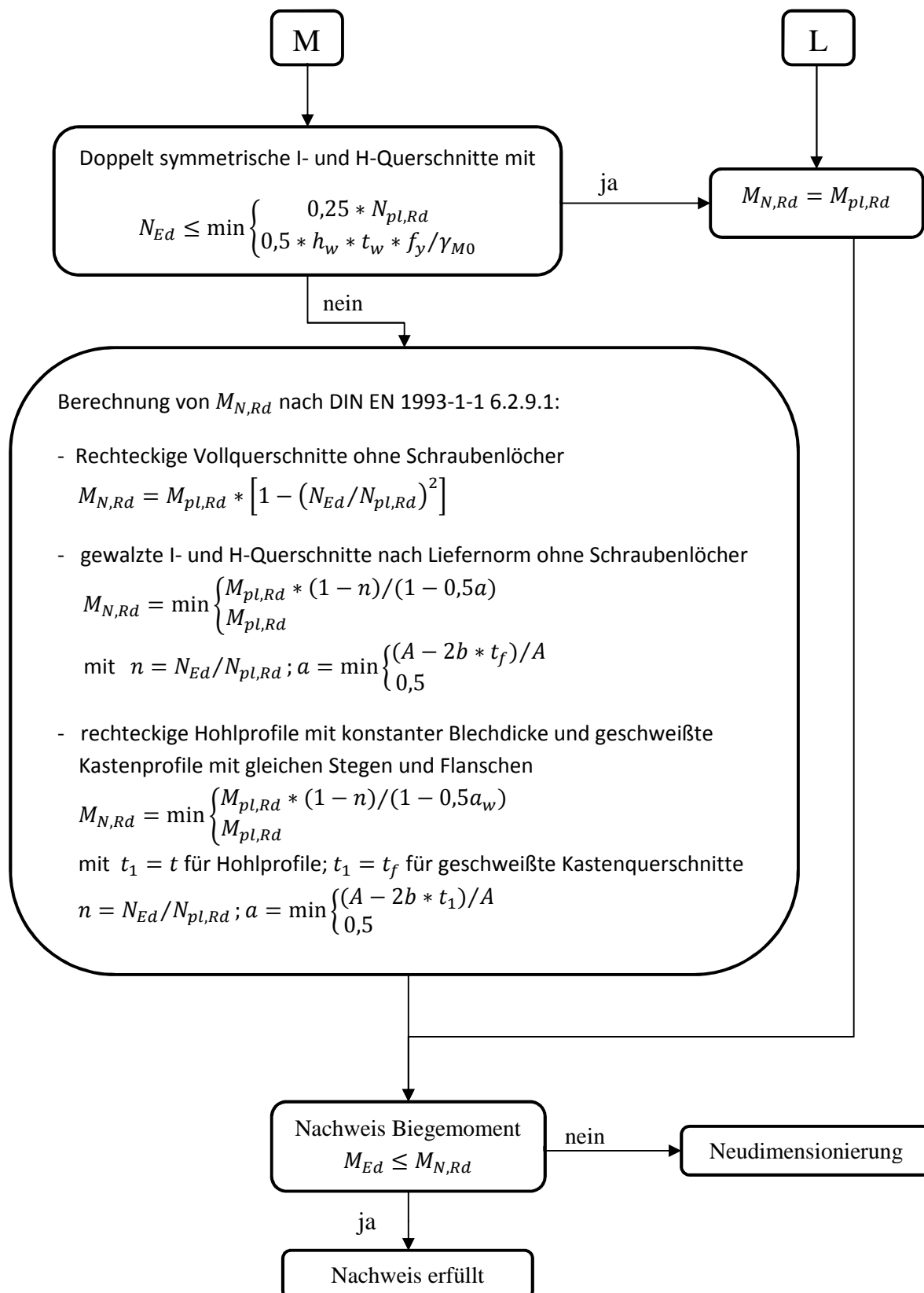


Abbildung 4: Nachweis eines Profilquerschnitts nach Eurocode 4 von 4

2.2.2 Nachweisschema für Schraubenverbindungen mit Längs- und Querkräften und Stahlsorten nach EN 1993-1-8:2010 (D)³

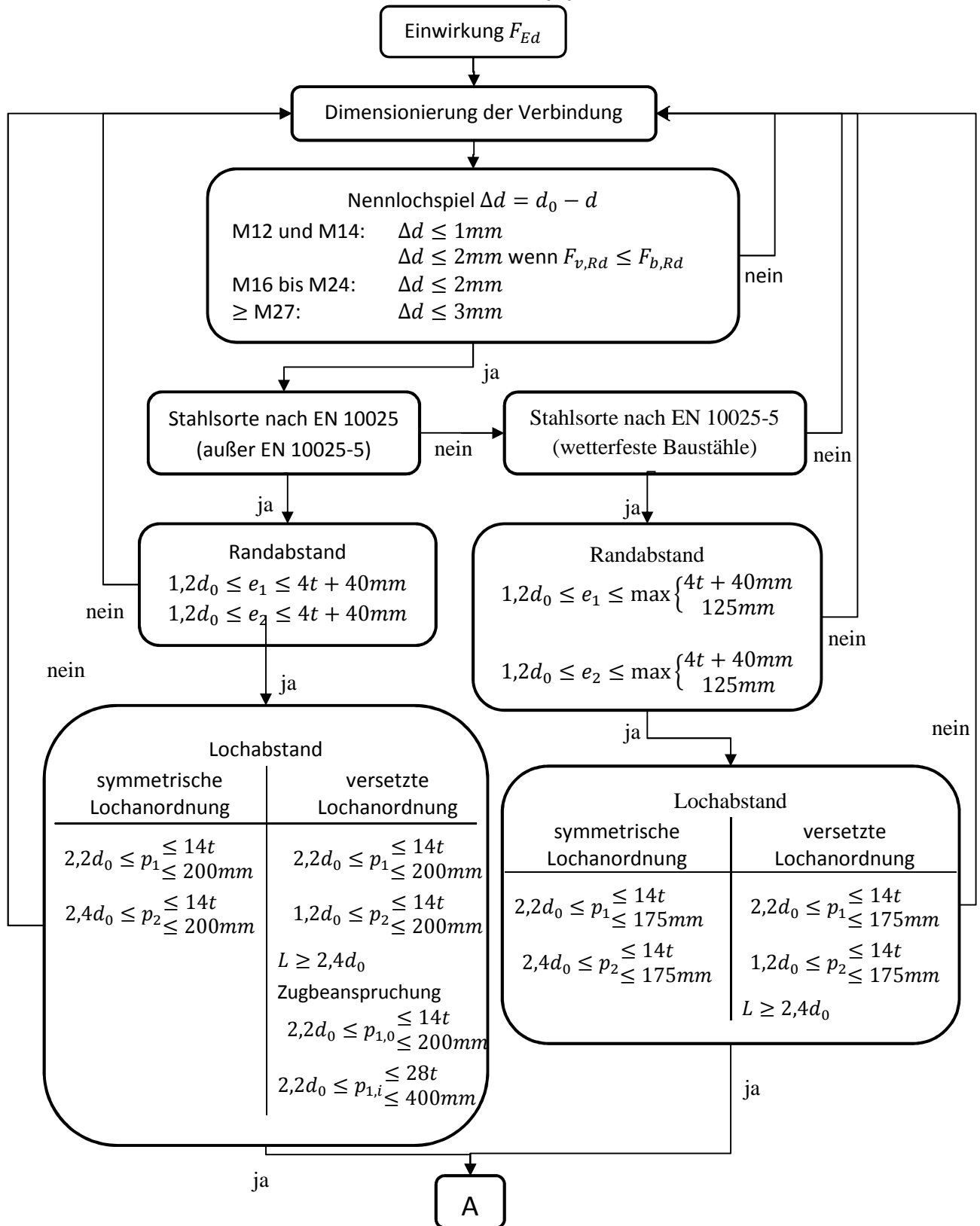


Abbildung 5: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 1 von 5

³ nach (Auerswald, 2009) Seite 17-19

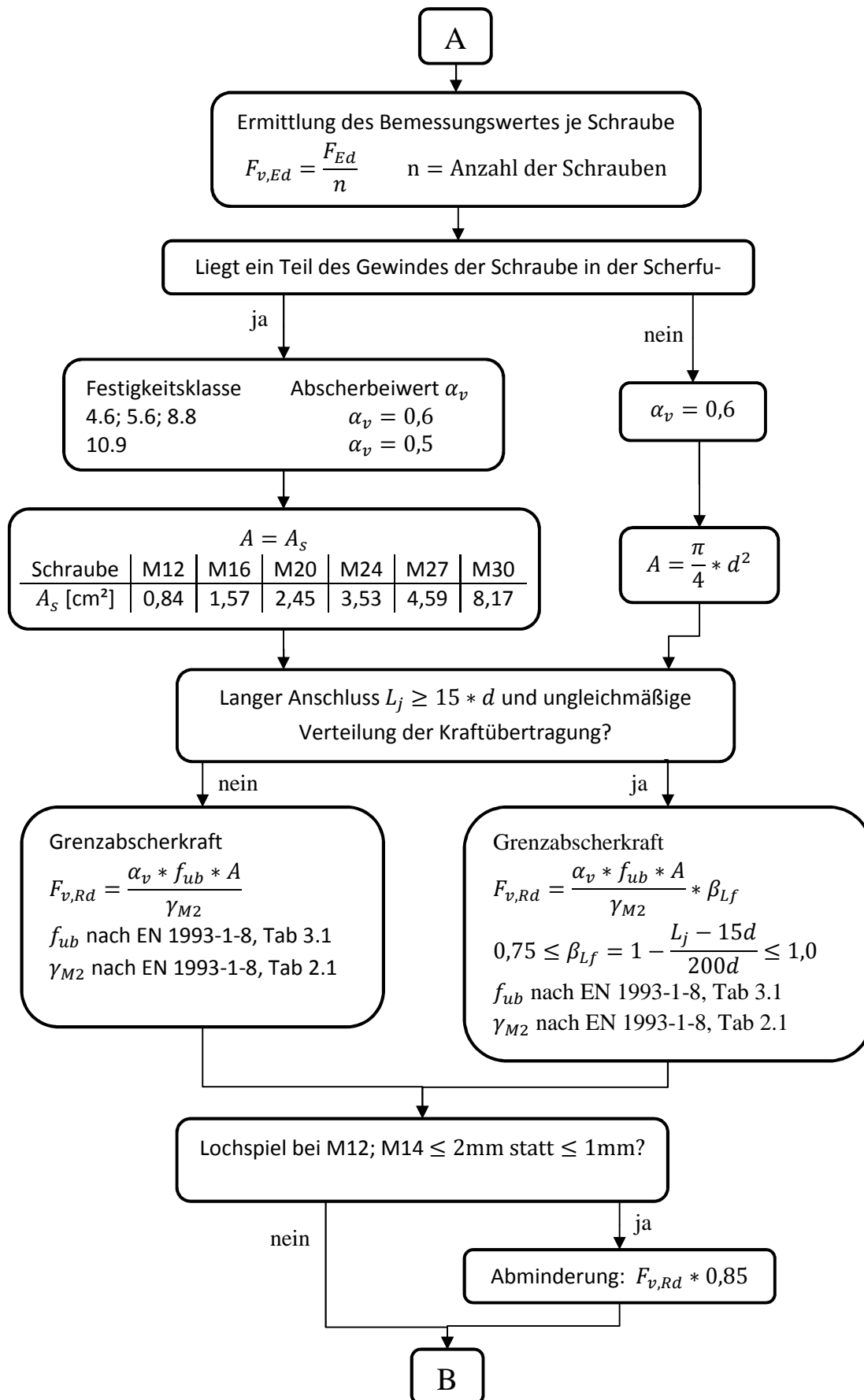


Abbildung 6: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 2 von 5

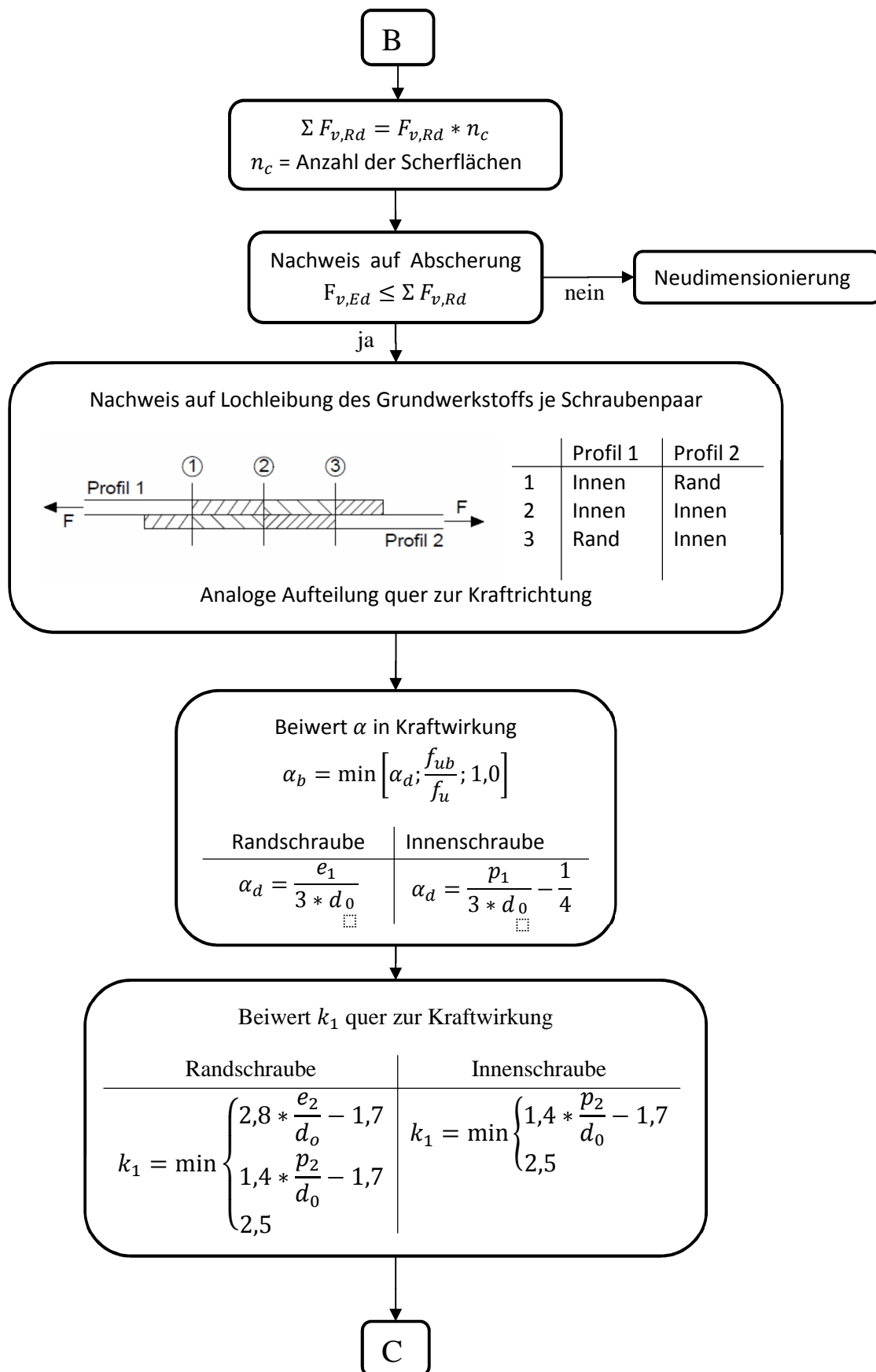
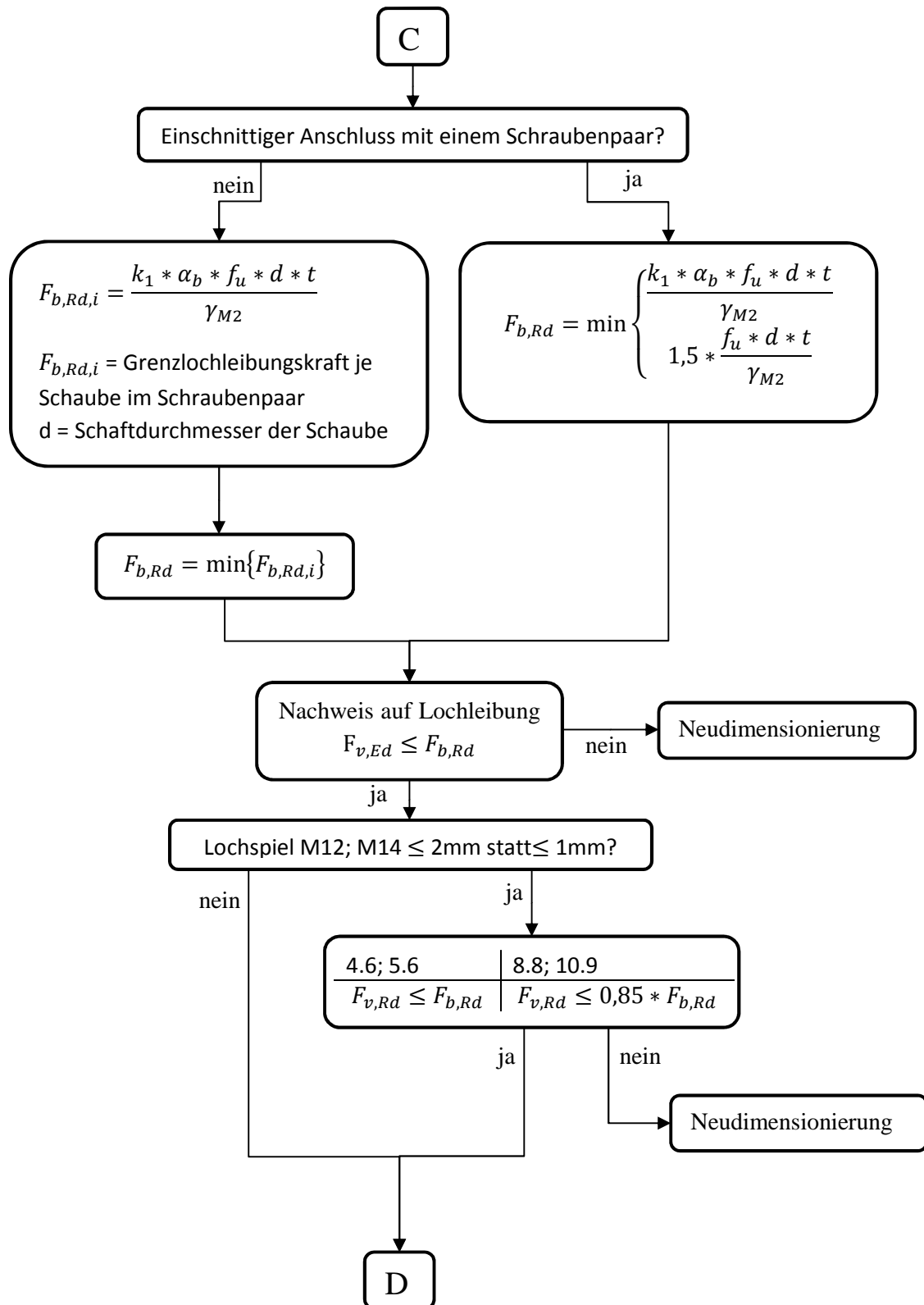


Abbildung 7: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 3 von 5



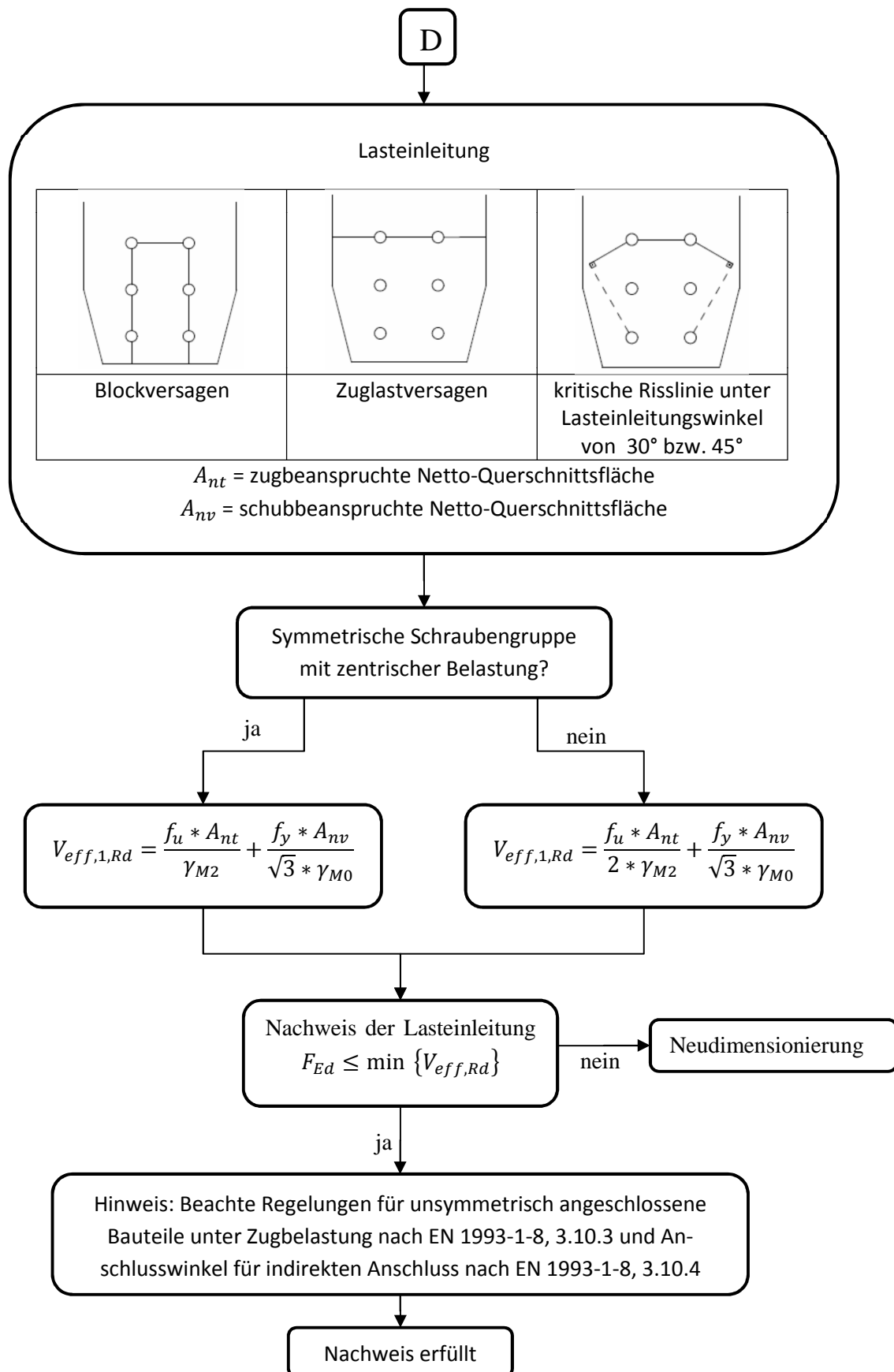


Abbildung 9: Nachweisschema einer Schraubenverbindungen nach Eurocode 5 von 5

2.2.3 Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach EN 1993-1-8:2010, 4 (D)⁴

Der Nachweis ist gültig für durchgeschweißte Kehlnahtverbindungen mit einem Flankenöffnungswinkel von 60° bis 120° und mittig angeschlossene Bauteile (d.h. es entsteht kein Biegemoment im Anschluss).

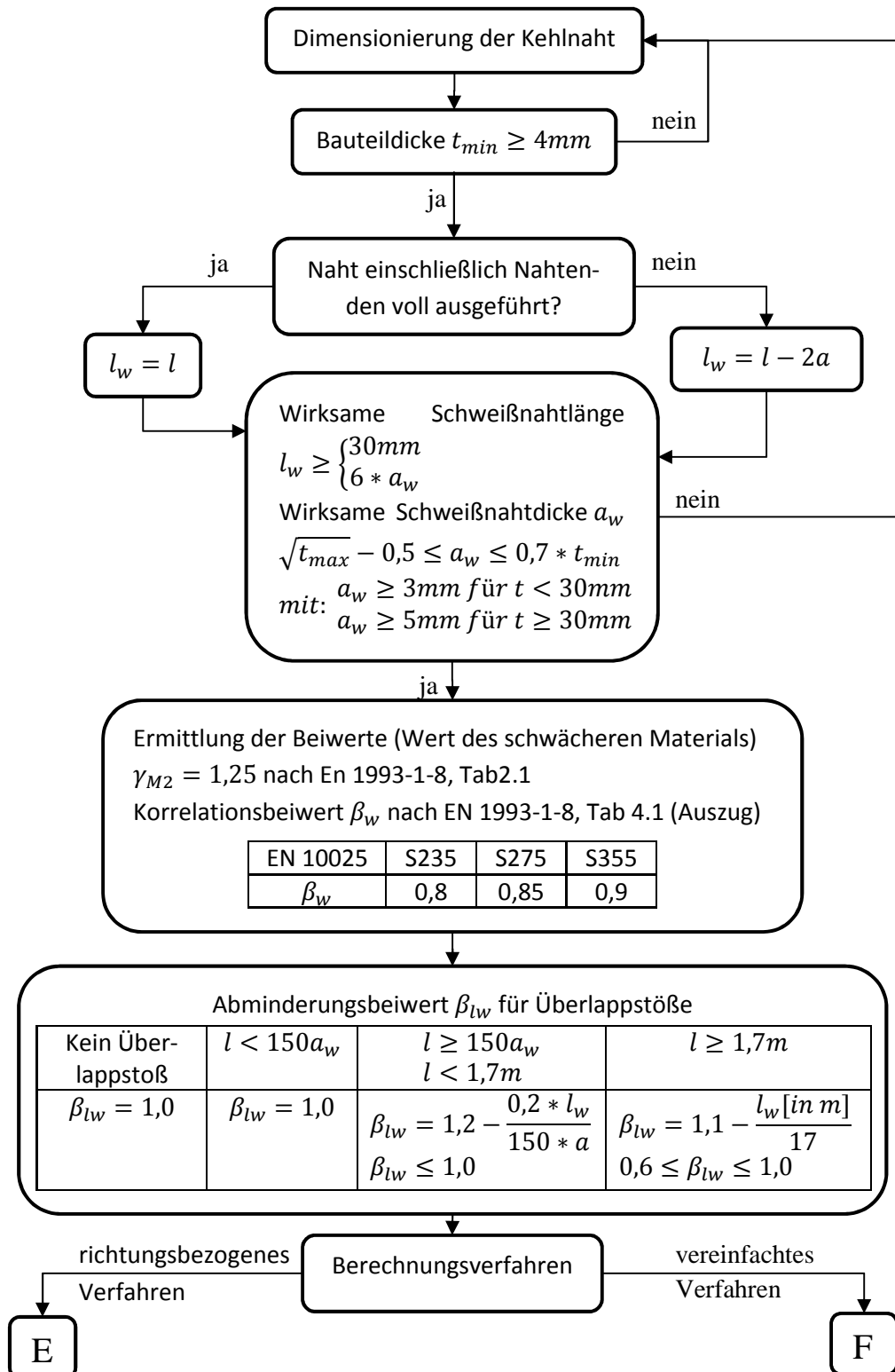


Abbildung 10: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 1 von 4

⁴ nach (Auerswald, 2009) Seite 46f

Richtungsbezogenes Verfahren

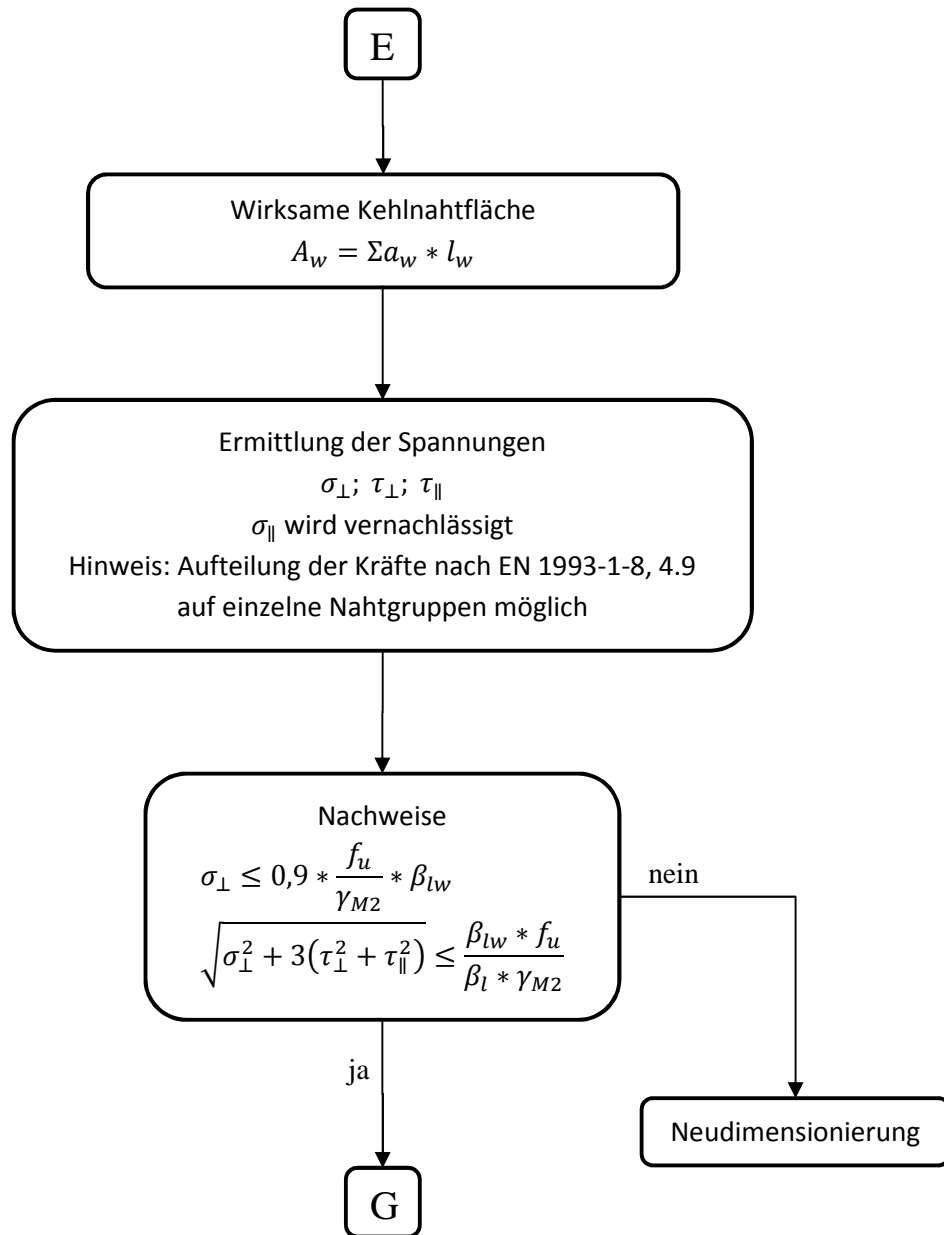


Abbildung 11: Nachweisschema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 2 von 4

Vereinfachtes Verfahren

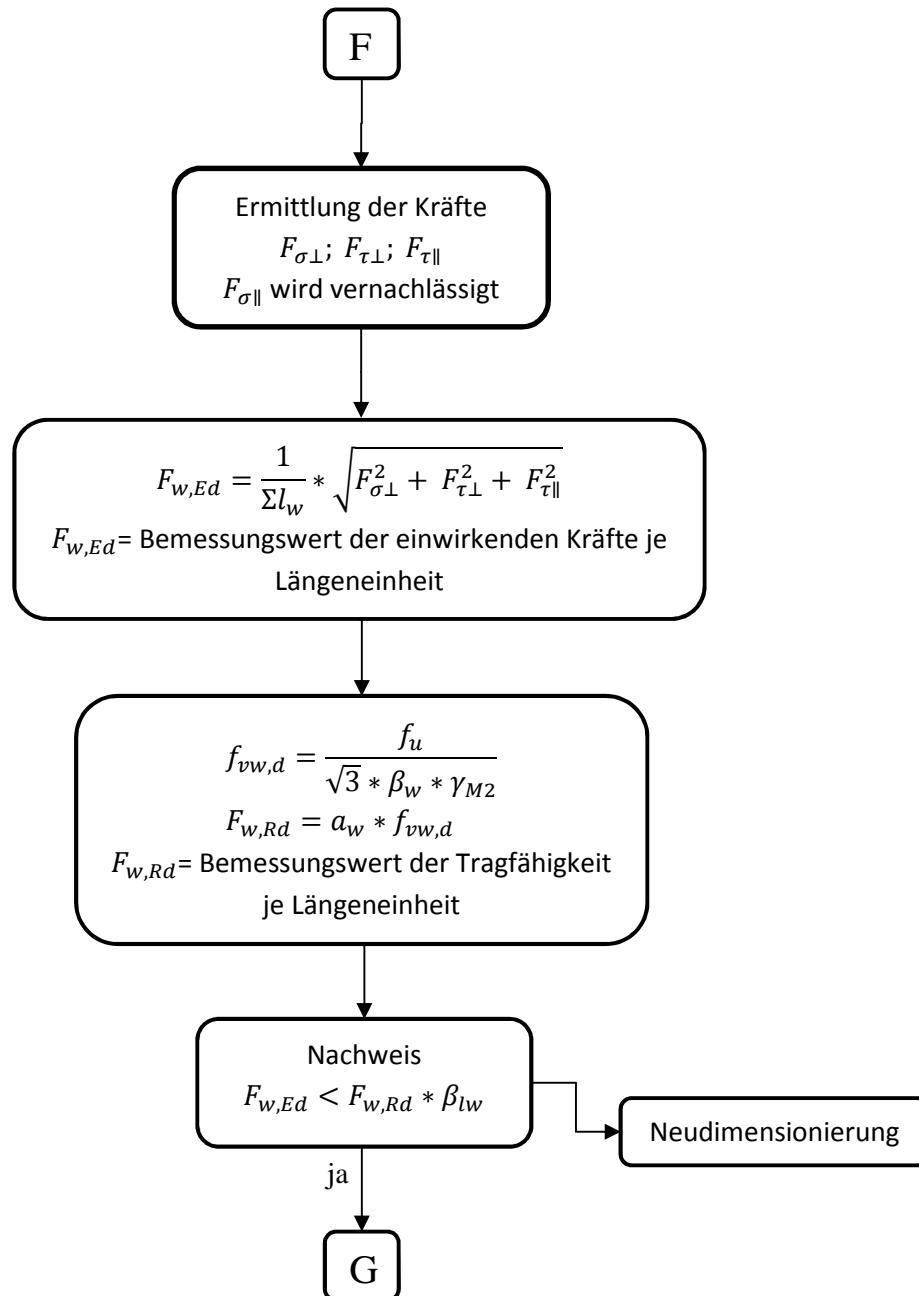


Abbildung 12: Nachweischema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 3 von 4

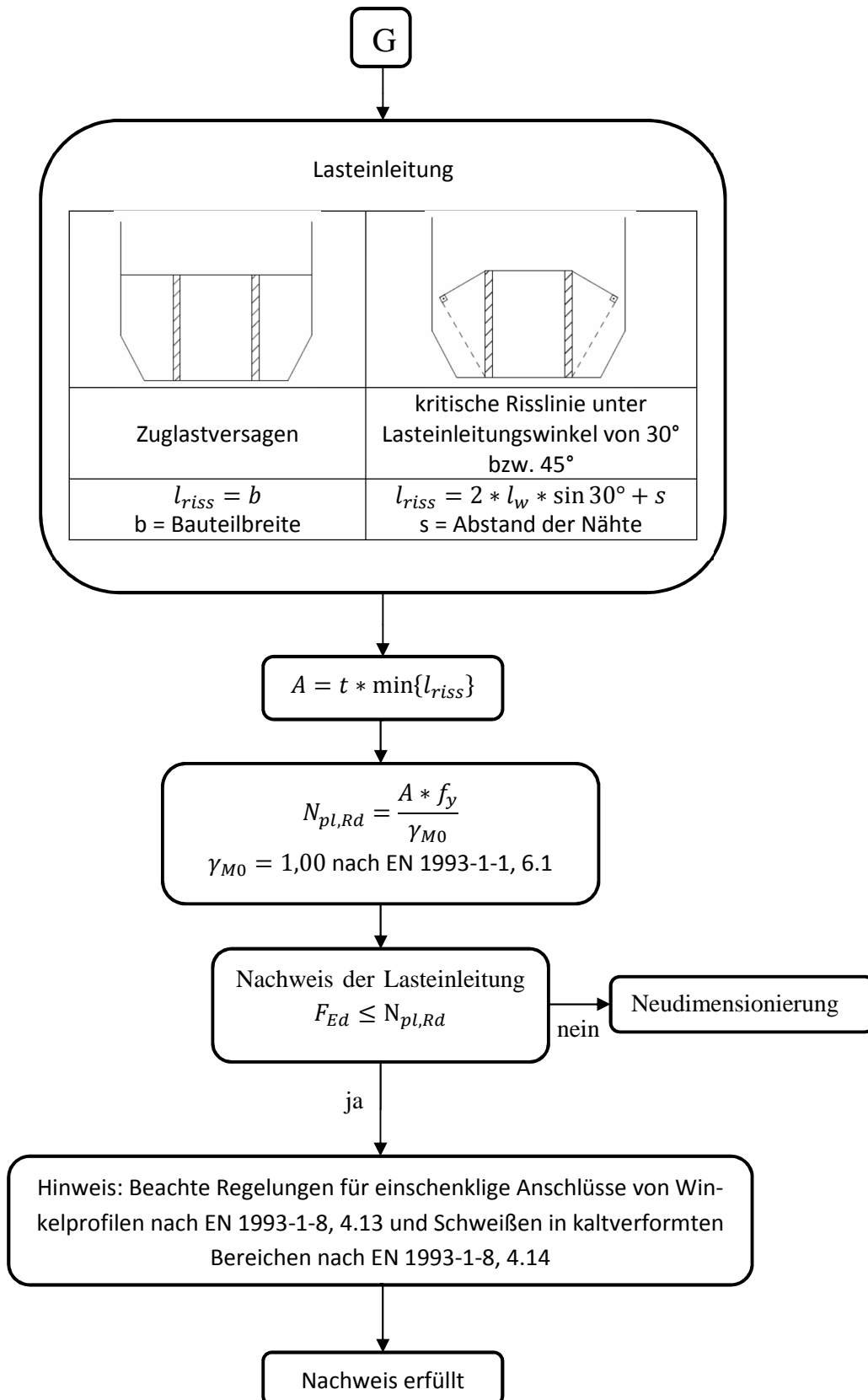


Abbildung 13: Nachweischema einer Kehlnahtverbindung nach Eurocode 4 von 4

2.2.4 Nachweisschema für steifenlose T-Anschlüsse an Flansche nach DIN EN 1993-1-8 4.10 (D)

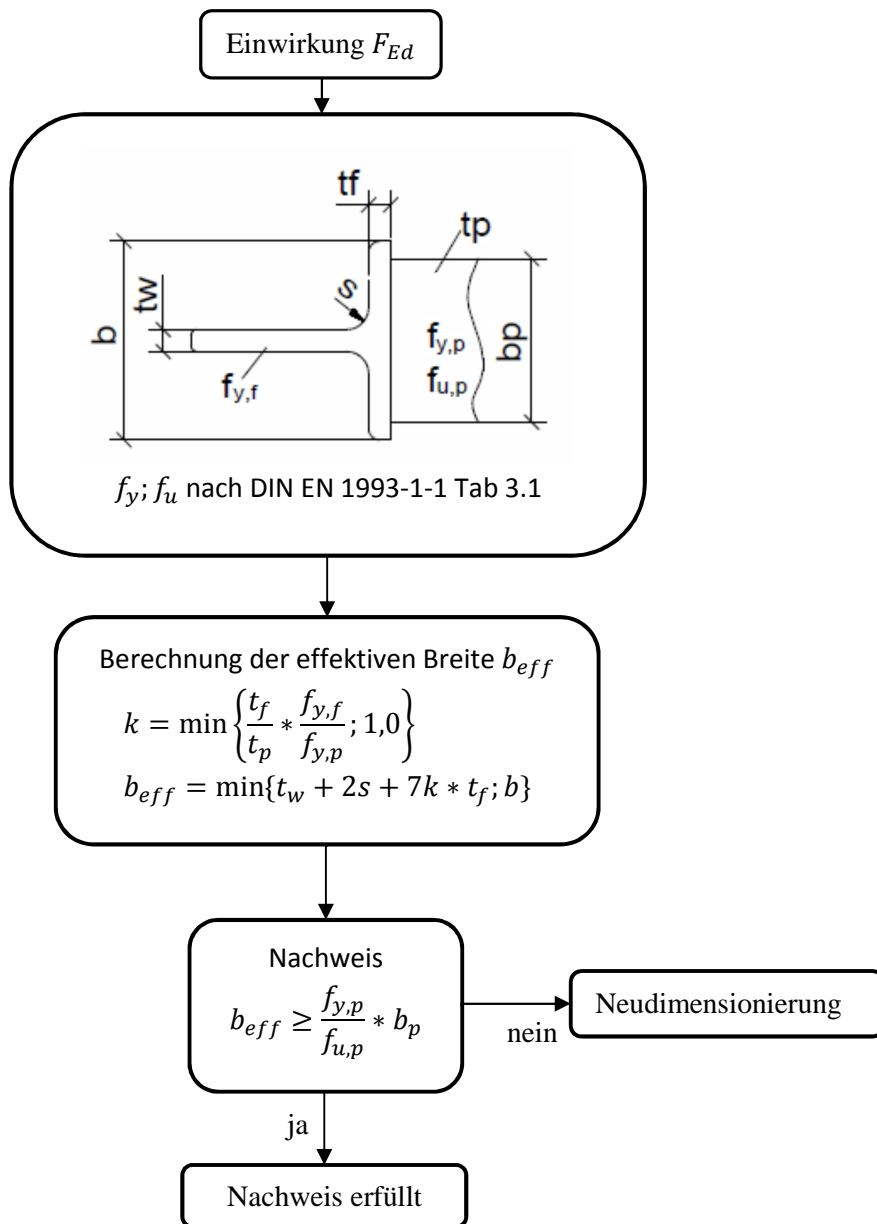


Abbildung 14: Nachweisschema für steifenlose T-Anschlüsse nach Eurocode

2.2.5 Ermittlung der Schraubenkräfte mittels des IP-Verfahrens

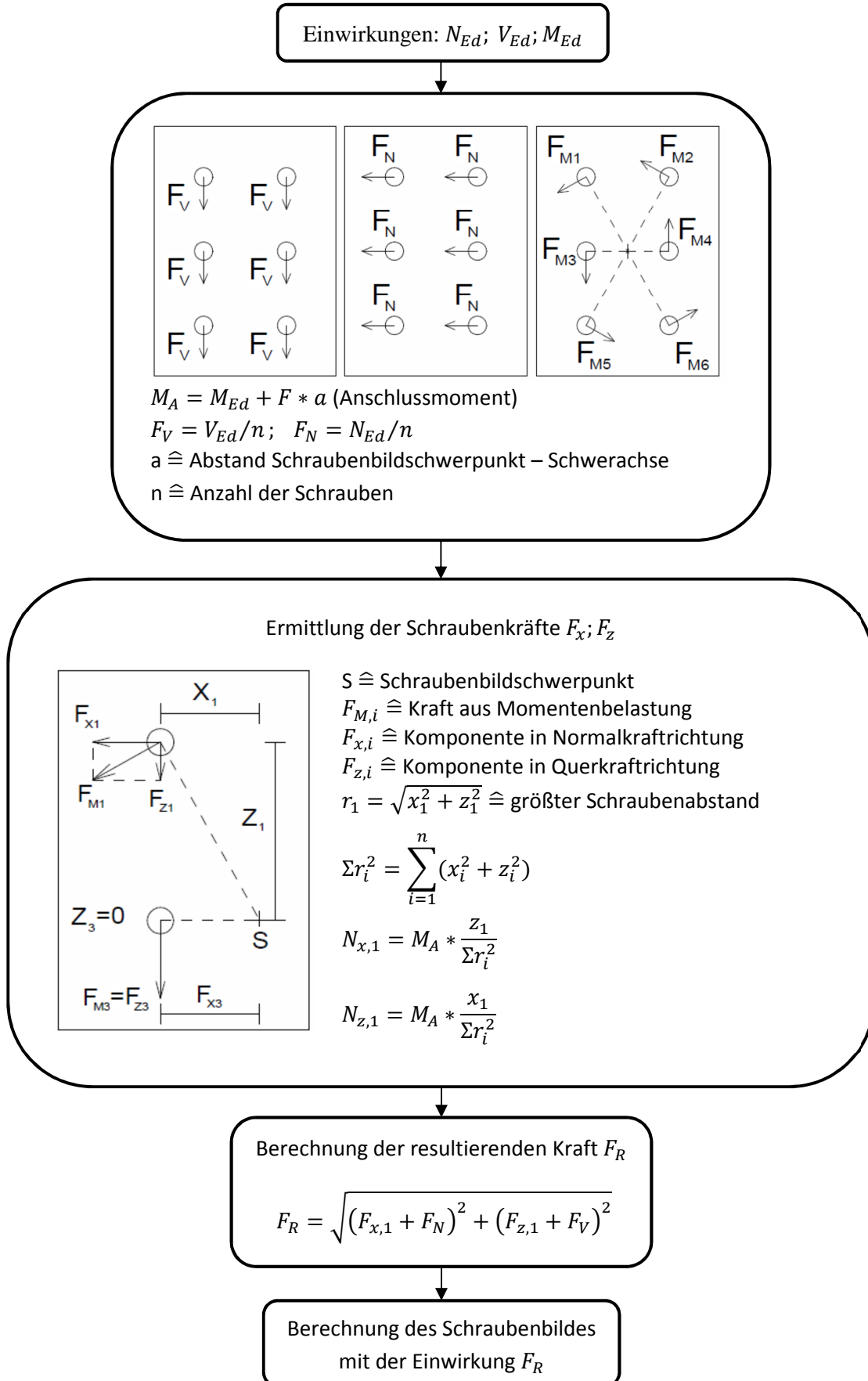


Abbildung 15: IP-Verfahren

2.3 Wirtschaftliche Betrachtung

2.3.1 Materialpreise

Die Materialpreise sind abhängig von mehreren Faktoren und können stark schwanken. Einige dieser Einflüsse sind:

- Angebot und Nachfrage des Rohstahls an der Börse
- Erzeuger / Lieferant
- Abmessungen
- Menge
- Kundenrabatte

Dieser Tatsache entsprechend ist die Unterscheidung in Stahlpreise in Materialpreise für Profile und Bleche und in Stückpreise für Verbindungsmittel ausreichend genau. Die Preise der hier verwendeten Mittel wurden von der Firma „Stahlbau Lüttewitz GmbH“ zur Verfügung gestellt und sich in Tabelle 1 aufgelistet:

Tabelle 1: Materialpreise

	Material	Bezugsgröße	Preis [€]
Profile	S235	kg	0,65
Blech	S235	kg	0,65
Blech	S355	kg	0,85
Schweißdraht ø1,2mm	G3Si1	kg	1,37
M12	4.6	Stk.	0,53
M16	4.6	Stk.	0,85
M20	4.6	Stk.	1,17
M24	4.6	Stk.	2,23
M16	8.8	Stk.	1,05
M16	10.9	Stk.	1,31

2.3.2 Fertigungszeiten

2.3.2.1 Allgemeines

Die Ermittlung der Fertigungszeiten setzt die Kenntnis des Fertigungsablaufes voraus. Aufgrund der Tatsache, dass die Fertigung in Stahlbauunternehmen nicht nach einem allgemeingültigen Prinzip abläuft, sondern zahlreiche Variationen, wie beispielsweise in der Maschinentechnik oder der Laufwegen, vorzufinden sind, wird die Fertigung anhand der Firma „Stahlbau Lüttewitz GmbH“ aufgezeigt.

Abschnitt 5.3.2.2 gibt eine Übersicht über den Fertigungsablauf und definiert die Zeiteinteilung, sowie die Losgröße. Die Folgenden Abschnitte geben die Zeiten der Produktionsstufen vom Bohr-Säge-Automaten (Abschnitt 5.3.2.3), der Bandsäge und Stanze (Abschnitt 5.3.2.4), der Plasmaschneidanlage (Abschnitt 5.3.2.5), des Zusammenbauplatzes (Abschnitt 5.3.2.6), des Schweißplatzes (Abschnitt 5.3.2.7) und der Montage (Abschnitt 5.3.2.8) wieder.

2.3.2.2 Fertigungsablauf, Zeiteinteilung und Losgröße

Die Fertigung eines Bauteils ist in mehrere Produktionsstufen unterteilt, die aufeinanderfolgend oder auch parallel zueinander ablaufen. In Abbildung 16 sind die Produktionsstufen der betrachteten Fertigung dargestellt.

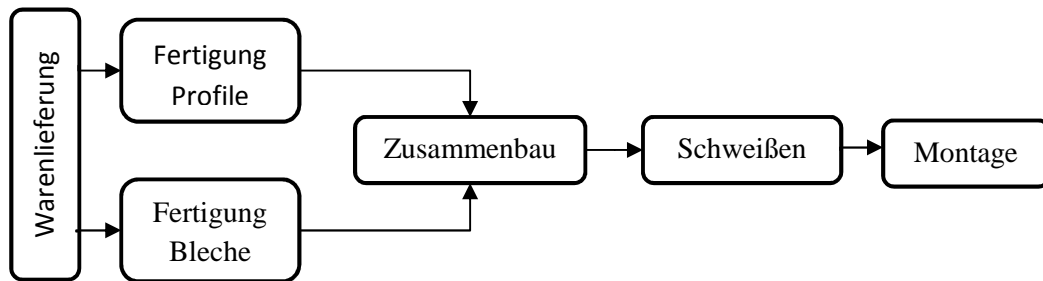


Abbildung 16: Produktionsstufen im Stahlbau

Bei diesem Ablauf werden einige Fertigungsstufen und -kosten bei der Kostenberechnung nicht berücksichtigt. Zu erwähnen seien die Warenlieferung und die Lagerungskosten der Halbzeuge, die Beschichtung und der Transport zur Baustelle.

Während der Fertigung werden mehrere Bauteile parallel gefertigt. Um Stillstandzeiten zu vermeiden, werden die Bauteile zwischen jedem Produktionsschritt in einem Zwischenlager abgestellt. Die einzelnen Produktionsstufen sind in Tabelle 2 dargestellt und können im Allgemeinen in drei Phasen unterteilt werden: Vor- und Nacharbeitszeit, Hauptzeit und Nebenzeit. Innerhalb einer Produktionsstufe sind mehrere Tätigkeiten möglich. Bei dem Wechseln zwischen den beiden Haupttätigkeiten kommt zusätzlich zu den entsprechenden Nebenzeiten einmal die Wechselzeit hinzu.

Tabelle 2: Übersicht der Fertigungszeiten

Hauptzeit	Die Hauptzeit der Fertigung ist die Zeit, in der aktiv am Bauteil die gewünschten Änderungen vorgenommen werden. Hierzu zählen Tätigkeiten wie beispielsweise sägen, bohren, schweißen oder brennen.
Nebenzeit	In der Nebenzeit werden alle Tätigkeiten vorgenommen die zum Ausführen der Hauptzeittätigkeiten unmittelbar benötigt werden. Hierzu gehören ausrichten, messen, einspannen, umsetzen des Brenner- oder Bohrkopfes oder wenden des Bauteils.
Vor- und Nacharbeitszeit	Die Vor- und Nacharbeitszeit ist die Zeit die benötigt wird um an einem Arbeitsplatz mit der Fertigung zu beginnen und diesen nach der Fertigung wieder in den Ausgangszustand zu versetzen. Diese Zeit beinhaltet den Transport der Materialien zum Arbeitsplatz, sowie vom Arbeitsplatz zum Zwischenlager sowie alle Nebenzeiten vor Beginn der ersten Hauptzeit.
Wechselzeit	Werden während einer Produktionsstufe mehrere Hauptzeiten verschiedener Tätigkeiten durchgeführt, wird zusätzliche Zeit benötigt um das Werkzeug zu wechseln oder die Maschine umzurüsten. Diese und ähnliche Zeiten werden in der Wechselzeit zusammengefasst.

Die Genauigkeit, mit der diese Zeiten angegeben werden können ist als gering einzustufen, da die Fertigung im Stahlbau üblicherweise auf Einzelfertigung ausgelegt ist und erfahrungsgemäß nur in Ausnahmefällen über die Kleinserie⁵ hinausgeht. Die daraus resultierenden häufigen Wechsel zwischen Größen und Formen der hergestellten Bauteile erschweren das Ermitteln genauer Werte. Zudem werden die in der Halle zur Verfügung stehenden Hebemittel (z.B. Kräne oder Hubwagen) von mehreren Arbeitsplätzen benutzt, was zu nicht planbaren Stillstandzeiten führen kann. Daraus folgt, dass eine genauere Zeitberechnung als im Minutenbereich nicht möglich ist.

Die Losgröße eines Bauteils kann, wenn die Dimensionen es erlauben, Einfluss auf einzelne Zeiten haben. Dies ist der Fall, wenn kompakte Bauteile in einem Behälter transportiert und an einem Arbeitsplatz bearbeitet werden. In der Regel werden die Bauteile einzeln gefertigt (Losgröße: 1). An einem Bauteil sind üblicherweise mehrere Anschlüsse angebracht, wodurch die Transportzeiten des Bauteils auf die Zahl der Anschlüsse zu verteilen sind. Die Losgrößen werden in dieser Arbeit beispielhaft, wie in Tabelle 3 aufgezeigt, festgelegt.

Die in den folgenden Kapiteln aufgelisteten Fertigungszeiten sind Richtwerte, deren Größe angenommen wurde. Als Grundlage dienen Zeitmessungen ähnlicher Bauteile aus der laufenden Fertigung der Firma „Stahlbau Lüttewitz GmbH“.

Tabelle 3: Losgrößen der untersuchten Anschlussdetails

Detail	Druckrohr	Fachwerk	Querkraftanschluss
Losgröße	30	5	2

2.3.2.3 Bohr-Säge-Automat

Stahlprofile werden hauptsächlich mittels eines Bohr-Säge-Automaten hergestellt (siehe Abbildung 17). Die Profile gelangen über ein Fördersystem zur Anlage, werden dort gebohrt und auf Länge geschnitten. Die erforderlichen Abmessungen werden über die EDV abgerufen. Nach der Bearbeitung transportiert der Bediener das Profil mit einem Kran zum Zwischenlager. Die Fertigungszeiten, sowie für deren Berechnung erforderlichen Werte sind in Tabelle 4 enthalten.

⁵ In der Serienfertigung treten Arbeitsprozesse in begrenzten Wiederholungen (Lose) auf. Von Kleinserienfertigung wird gesprochen, wenn die Losgröße einige Dutzend nicht überschreitet. Die untere Begrenzung bildet die Einzelfertigung. Nach (Goldhahn, 2013)



Abbildung 17: Bohr-Säge-Automat

Tabelle 4: Parameter des Bohr-Säge-Automaten

Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Vor- und Nacharbeitszeit	Transportzeit	4 min
Hauptzeit	Schnittgeschwindigkeit	4 cm/min
	Bohrzeit	0,1 min
Nebenzeit	Sägenebenzeit	1 min
	Bohrnebenzeit ¹	0 min
Wechselzeit	Umrüstzeit ²	0 min

¹ Die Bohrzeiten sind so gering, dass eine separate Ausweisung der Nebenzeiten entfällt.
² Die Werkzeuge sind voneinander unabhängig, aber nicht gleichzeitig anwendbar, sodass eine Umrüstzeit entfällt

2.3.2.4 Bandsäge und Stanze

Kleinere Profilgrößen und Profile, die sich nicht in dem Bohr-Sägen-Automaten einspannen lassen, werden auf der Bandsäge bearbeitet (Abbildung 18). Die Bandsäge besitzt keine Vorrichtung zum Bohren. Sind an dem Profil Löcher anzubringen, erfordert dies zusätzlich den Transport zu einer Stanzmaschine. Das Ausrichten der Werkstücke erfolgt bei beiden Maschinen manuell, d.h. ohne den Einsatz von EDV. Tabelle 5 beinhaltet die zur Zeiterfassung erforderlichen Parameter.



Abbildung 18: Bandsäge

Tabelle 5: Parameter der Bandsäge und der Standbohrmaschine


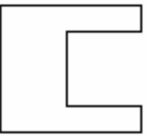
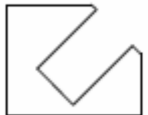
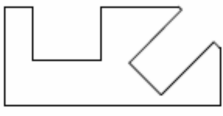
Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Vor- und Nacharbeitszeit	Transportzeit ¹	10 min
Hauptzeit	Schnittgeschwindigkeit	3,6 cm/min
	Stanzzeit	0,1 min
Nebenzeit	Sägenebenzeit	1 min
	Stanznebenzeit	4 min
	Zwischenzeit ²	0,1 min
Wechselzeit	Transportzeit ¹	4 min

¹ Der Transport von, zu und zwischen den Maschinenplätzen erfolgt mit dem Kran.
² Zwischen dem Stanzen zweier Löcher wird das Werkstück neu positioniert. Die Zwischenzeit gibt die dazu erforderliche Zeitspanne an.

2.3.2.5 Plasmaschneidanlage

Die Herstellung der einzelnen Bleche erfolgt aus einer Plasmaschneidanlage, wie sie auf Abbildung 20 dargestellt ist. Bleche werden aus Blechtafeln ausgeschnitten, deren Standardmaß bei 3 x 1,5 Meter liegt. Die Blechtafel wird mittels Kran auf die Anlage gelegt und ausgerichtet. Nachdem die Lage des Bleches in die Recheneinheit eingegeben wurde, startet der Bediener das entsprechende Schneidprogramm. Dabei werden Bleche verschiedener Aufträge aus derselben Tafel ausgebrannt. In Tabelle 7 sind die zur Berechnung der Fertigungszeit erforderlichen Parameter enthalten. Das EDV-Programm legt die Aufteilung der Bleche fest, mit dem Ziel, den Verschnitt möglichst gering zu halten. Ein Beispiel einer solchen Schachtelung ist in Abbildung 19 dargestellt. Den größten Einfluss auf den Verschnitt hat die Form des jeweiligen Blechs, daher ist zur Kalkulation die Fläche des Blechs mit einem Faktor zu vergrößern. In der Tabelle 6 sind die Faktoren der hier verwendeten Bleche dargestellt:

**Tabelle 6: Verschnittfaktoren
ausgewählter Blechgeometrien**

Form:	Verschnittfaktor:
	1,05
	1,2
	1,2
	1,3

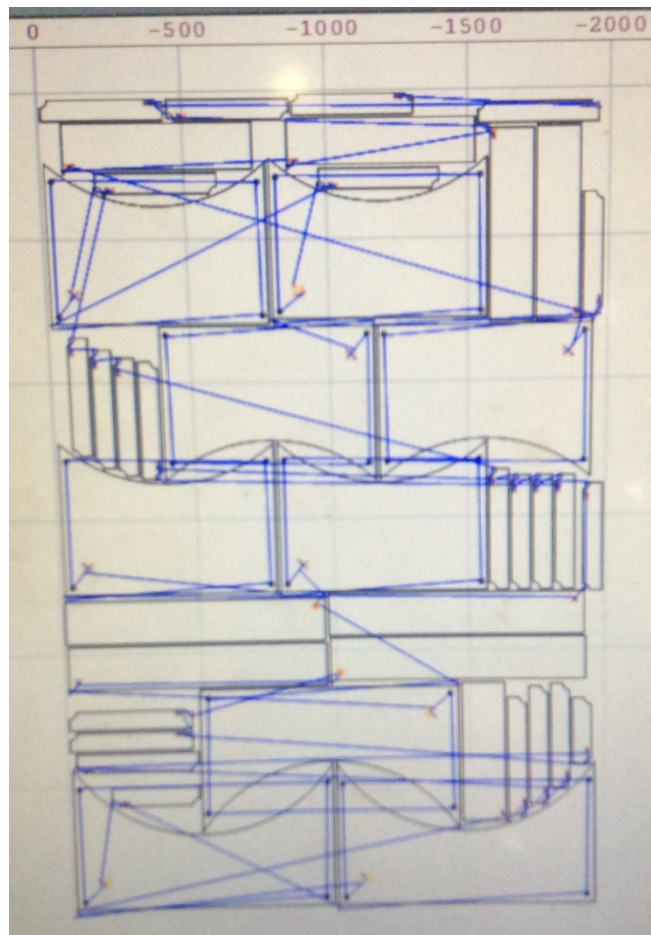


Abbildung 19: Schachtelung einer 2000 x 3000 mm Tafel



Abbildung 20: Plasmaschneidanlage

Tabelle 7: Parameter der Plasmaschneidanlage

Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Vor- und Nacharbeitszeit	Transportzeit; Nachbearbeitungszeit ¹	25 min
Hauptzeit	Schnittgeschwindigkeit ²	104 cm/min
Nebenzeit	Nebenzeit Plasmaschnitt $A_{Bl} < 900 \text{ cm}^2$	1 min
	Nebenzeit Plasmaschnitt $A_{Bl} > 900 \text{ cm}^2$	2 min
Wechselzeit	Umsetzzeit ³	0,8 min

¹ In der Nachbearbeitungszeit werden die Bleche zum Entgraten in einer Trommel mit Hartmetallkugeln gelegt.

² Die Ideale Geschwindigkeit beträgt 1,3 m/min entspricht nicht Praxis. Der Wert wurde auf 80% abgemindert.

³ Die Umsetzzeit besteht aus der erforderlichen Zeit die Benötigt wird, den Schneidkopf umzusetzen und das Stichloch zu erzeugen.

2.3.2.6 Zusammenbau

Auf dem Zusammenbauplatz werden die einzelnen Profile und Bleche zu einem Bauteil verbunden. Zu diesem Vorgang zählen neben dem Heftvorgang⁶ auch die Vorbereitung der Anschlüsse, sofern dies nicht in einem früheren Produktionsschritt vollzogen wurde und die Kontrolle der Abmessungen hinzu. Die Länge der Zeiten ist abhängig von der Größe des Bauteils, da während des Heftvorgangs das Bauteil gedreht werden muss, um alle Heftnähte anzubringen. In dieser Arbeit wird zwischen kompakten und sperrigen Bauteilen unterschieden. Kompakte Bauteile können mit der Hand oder mittels eines Hebels in ihrer Lage verändert werden. Als sperrig werden Bauteile größerer Dimensionen bezeichnet, die zur Lageänderung den Einsatz des Werkstattkranes erfordern. Der Transport geschieht in der Regel mittels Kran. Die entsprechenden Parameter des Zusammenbauplatzes werden in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Zeiten des Zusammenbauplatzes

Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Vor- und Nacharbeitszeit	Transportzeit (kompakt)	4 min
	Transportzeit (sperrig)	10 min
Hauptzeit (kompakt)	Heftzeit ¹	1 min
	Zeit Schlitzen	10 min
Hauptzeit (sperrig)	Heftzeit ¹	5 min
Nebenzeit (kompakt)	Nebenzeit Heften Druckrohr ¹	1,2 min
	Nebenzeit Heften Fahnenblech	3 min
	Nebenzeit Heften Stirnplatte	5 min
Nebenzeit (sperrig)	Nebenzeit Heften ¹	10 min
Wechselzeit	Werkzeugwechsel ²	0 min
¹ Die Zeit gilt je anzuschließendes Werkstück.		
² Eine separate Wechselzeit wurde nicht ausgewiesen.		

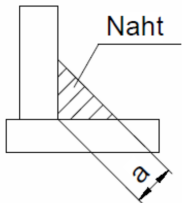
2.3.2.7 Schweißplatz

Auf dem Schweißplatz werden die zuvor gehefteten Bauteile vollständig verbunden. In dieser Arbeit wird das in Stahlbauunternehmen übliche Metall-Aktivgas-Verfahren (MAG-Verfahren) angewandt. Je nach Abmessung und Zugänglichkeit der Naht werden das Unterpulver-(UP-), das Wolfram-Inertgas-(WIG-) oder das Lichtbogenhandschweiß-(E-Hand-)verfahren als Alternativen eingesetzt. Zur Ermittlung der Hauptzeit wird die zu schweißende Nahtlänge betrachtet. Die dabei benötigte Zeit hängt von der Nahtdicke ab. Mit steigender Nahtdicke erhöht sich das Volumen der Naht und dies bedingt eine Abminderung der Schweißgeschwindigkeit, da die Abschmelzleistung⁷ des Schweißverfahrens begrenzt ist. In Tabelle 9 ist die Abhängigkeit zwischen Nahtdicke und Schweißgeschwindigkeit dargestellt, wie sie in dieser Arbeit angenommen wird.

⁶ Das vorläufige Verbinden von Einzelteilen durch Schweißpunkte bzw. kurze Schweißnähte wird als heften bezeichnet.

⁷ Die Abschmelzleistung beschreibt die Menge an Schweißgut, die in einer definierten Zeitspanne erzeugt werden kann. Beim MAG-Verfahren liegt die Abschmelzleistung bei etwa 3 kg/Std (Hübner, 2013)

Tabelle 9: Nahtdicke und Schweißgeschwindigkeit

Nahtdicke ¹	a=3mm	a=4mm	a=5mm	a=6mm	
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	34	32	28	25	
¹ Größere Nähte sind in mehreren Lagen zu schweißen, die nahtlänge ergibt sich dann aus Summe der einzelnen Lagenlängen					

Die in der Norm⁸ verwendeten Nahtabmessungen stellen Idealwerte dar, die in der Praxis nicht erreicht werden können. Eine real geschweißte Naht besitzt größere Dimensionen, um das berechnete Wurzelmaß, welches das zu erreichende Minimalmaß darstellt, in keiner Stelle zu unterschreiten. Um dies zu berücksichtigen wird ein Aufschlagsfaktor für das Nahtvolumen eingeführt. In dieser Arbeit wird der Aufschlagsfaktor entsprechend der Tabelle 10 angenommen.

Tabelle 10: Aufschlagsfaktor des Nahtvolumens in Abhängigkeit der Nahtdicke

Nahtdicke	a<6mm	a≥6mm
Aufschlagsfaktor des Nahtvolumens	1,22	1,1
a-Maß siehe Abbildung in Tabelle 10		

Die Hauptzeit, die als reine Schweißzeit zu verstehen ist, wird um einen Faktor vergrößert, um Verlängerung der Nebenzeit bei großen Nahtlängen zu berücksichtigen. Tabelle 11 beinhaltet die zur Zeiterfassung erforderlichen Parameter.

Tabelle 11: Zeiten des Schweißplatzes

Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Vor- und Nacharbeitszeit	Transportzeit ¹	10 min
Hauptzeit	Schweißgeschwindigkeit	s. o.
	Nebenzeitfaktor	1,2
Nebenzeit (Kompakt)	Nebenzeit Schweißen	1 min
Nebenzeit (Sperrig)	Nebenzeit Schweißen	20 min
Wechselzeit	Werkzeugwechsel ²	0 min
¹ Der Transport von, zu und zwischen den Maschinenplätzen erfolgt mit dem Kran.		
² Eine separate Wechselzeit wurde nicht ausgewiesen.		

2.3.2.8 Montage

Die große Vielfalt an Einflussfaktoren, wie sie bei einer Montage auftreten können, lässt eine genaue Kalkulation nicht zu. Einflussfaktoren, wie die Erreichbarkeit des Montageortes, die vorhandenen

⁸ DIN EN 1993-1-8; 4.5.2 (1): „Die wirksame Nahtdicke a einer Kehlnaht ist in der Regel als die bis zum theoretischen Wurzelpunkt gemessene Höhe des einschreibbaren (gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen) Dreiecks anzunehmen [...].“

Platzverhältnisse oder in der Umgebung befindliche Gefahrstoffe haben einen erheblichen Einfluss auf den Montageaufwand. Daher beschränkt sich die Betrachtung der Tätigkeiten, wie in Tabelle 12 dargestellt, auf das Ausrichten des Bauteils und dem Erstellen der Schraubenverbindung.

Tabelle 12: Betrachtete Montagezeiten

Zugehörige Zeit	Parameter	Wert
Hauptzeit	Einsetzen und Anziehen ¹ (4.6)	1 min
	Einsetzen und Anziehen ¹ (8.8; 10.9)	2 min
Nebenzeit	Ausrichten	10 min
¹ Die angegebene Zeit gilt je Schraube		

2.3.3 Betriebskosten

Die Betriebskosten umfassen die Lohnkosten der Arbeiter, die Kosten der Betriebsmittel und die Abschreibung der Maschinen. Die in der Tabelle 13 wiedergegebenen Werte wurden von der Firma „Stahlbau Lüttewitz GmbH“ zur Verfügung gestellt.

Tabelle 13: Betriebskosten der Produktionsstufen

Arbeitsbereich	Betriebskosten [€/Std.]
Bohr-Säge-Automat	60
Bandsäge / Stanze	30
Plasmaschneidanlage	60
Zusammenbau	30
Schweißplatz	30
Montage	40

3 Variantenuntersuchung von Anschlüssen

3.1 Allgemein

Im Stahlbau treten eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationen aus Einwirkungen, Konstruktionsvarianten und Materialien auf. Wie im Kapitel 1 beschrieben wurde, werden nur geringe Vorgaben an die Wahl der Profile in einer Ausschreibung gestellt. Insbesondere bei der Dimensionierung der Anschlüsse sind üblicherweise keine Vorgaben vorhanden. Alle notwendigen Parameter werden daher von einem Ingenieur des herstellenden Betriebes (sofern die Tragwerksplanung nicht an Dritte vergeben wird) festgelegt. Dabei werden die Parameter frei gesetzt. Anhaltspunkte sind Berufserfahrung, die Möglichkeiten des Betriebs und technische Unterlagen, wie beispielsweise bereits gefertigte Projekte oder das Verwenden von typisierten Anschlüssen. Dem entsprechend sind für eine geforderte Aufgabe mehrere technisch sinnvolle Varianten vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit ist es erforderlich, durch Festlegungen die enorme Anzahl möglicher Kombinationen zu begrenzen.

Für die Festlegung der Parameter liegen keine Angaben vor. Aus diesem Grund werden beispielhaft drei Anschlussdetails in verschiedenen Varianten ausgewählt. Die Angabe der festen Werte und der Variablen erfolgt dabei frei, die Größenordnung der Parameter entspricht real möglicher Elemente.

Abschnitt 3.2 beinhaltet die Rahmenbedingungen, sowie eine Übersicht über die betrachteten Konstruktionsvarianten. Auf der Definition der Rahmenbedingungen folgt in Abschnitt 3.3 die Erläuterung der Vorgehensweise. Der statisch-konstruktive Nachweis ist im Abschnitt 3.4 und die Kostenberechnung im Abschnitt 3.5 aufgeführt. Weiterhin beinhaltet Abschnitt 3.6 vollständige Rechenbeispiele.

3.2 Rahmenbedingungen

Bei der Berechnung und Konstruktion gibt es eine Vielzahl an möglichen Variablen, die zu einer unübersichtlichen Menge an Kombinationen führen. Dies führt zur Notwendigkeit, Festlegungen zu treffen, um die Zahl der zu untersuchenden Kombinationen zu verringern. Folgende Bedingungen wurden in dieser Arbeit getroffen:

- Die Berechnung wird mit der Stahlbaunorm DIN EN 1993 (Eurocode 3) durchgeführt
- Die Berechnung wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchgeführt
- Die Zahl der zu untersuchenden Details wird auf drei begrenzt: Druckrohranschluss, Fachwerkknoten und Querkraftanschluss
- Die Beanspruchung wird als überwiegend ruhend angenommen (keine schwingende Belastung)
- Eine Auslegung der Anschlüsse auf Anpralllasten und Erdbeben ist nicht erforderlich
- Die Einwirkungen sind als Bemessungswerte⁹ abgegeben, eine weitere Erhöhung durch Sicherheitsbeiwerte ist nicht erforderlich
- Die Profile und Bleche bestehen aus unlegiertem Baustahl der Sorten S235 oder S355
- Der Nachweis der Profile im Sinne der Stabilität wird als erfüllt vorausgesetzt
- Die Schwerlinien der Profile schneiden sich in einem Punkt, es entsteht keine Momentenbeanspruchung durch außermittig liegende Profile
- Der Profilquerschnitt bleibt bei allen Varianten erhalten und wird nicht der vorhandenen Belastung angepasst
- Es sind keine gesonderten Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit vorhanden
- Die Lage und Richtung der Kräfte in der verschiedenen Anschlussdetails sind in Abbildung 21 definiert
- Eine Auflistung der festgelegten und variablen Parameter ist in Abbildung 22 dargestellt

Abbildung 23 zeigt die konstruktiven Varianten der Anschlussdetails.

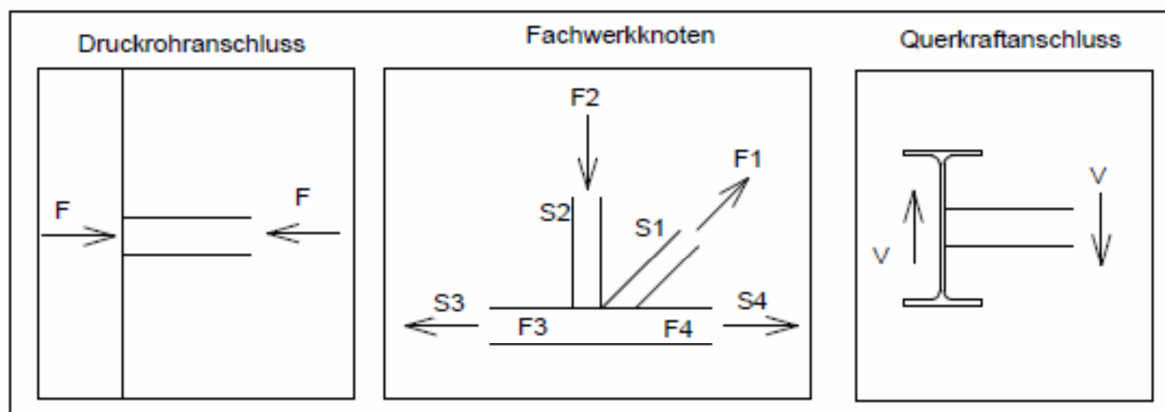


Abbildung 21: Verlauf der Kräfte der verschiedenen Anschlussdetails

⁹ Bemessungswerte sind charakteristische Werte, die durch Sicherheitsfaktoren erhöht wurden
 $(F_{Ed} = F_{Ek} * \gamma_i)$.

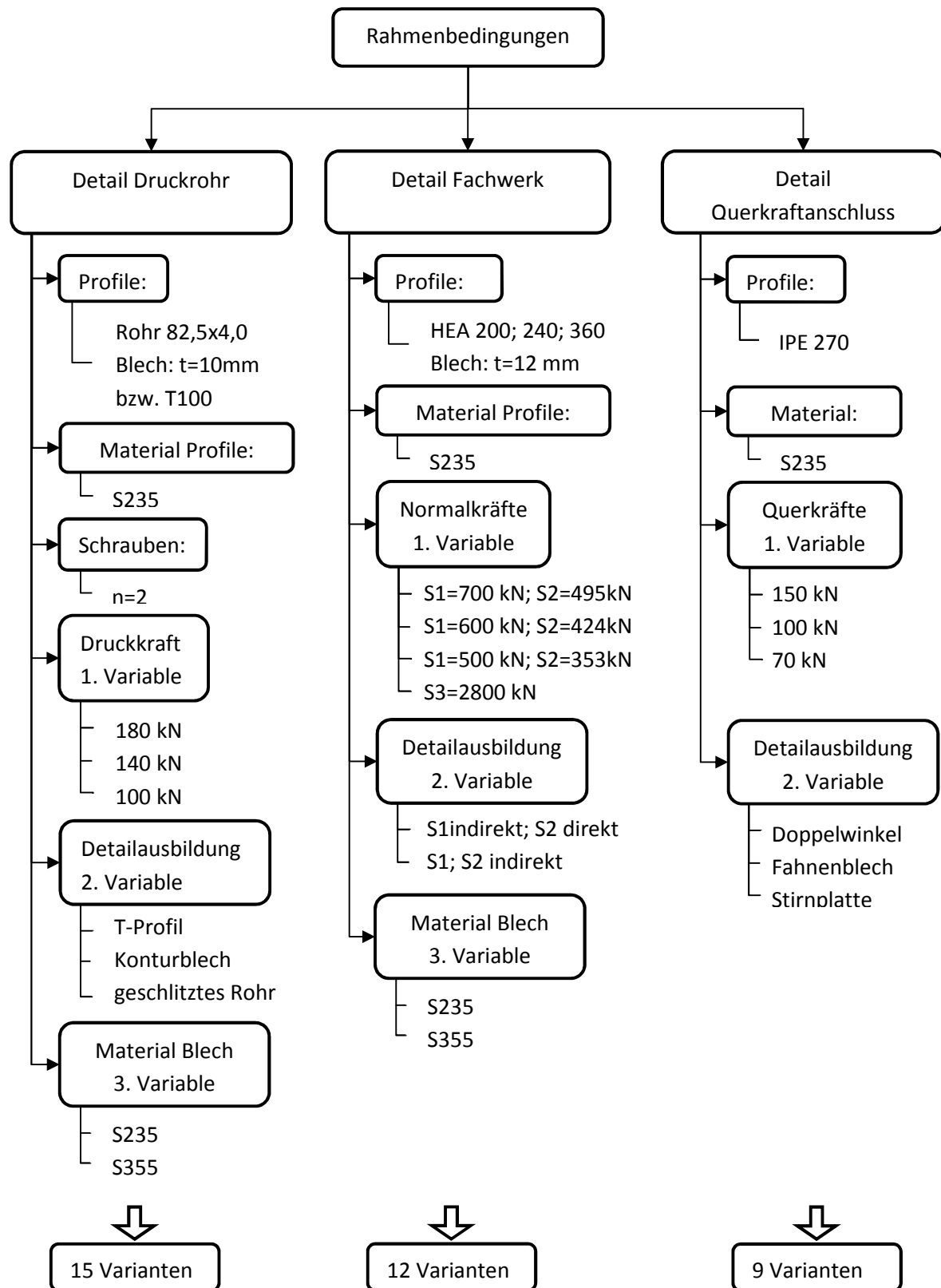


Abbildung 22: Übersicht der Rahmenbedingungen

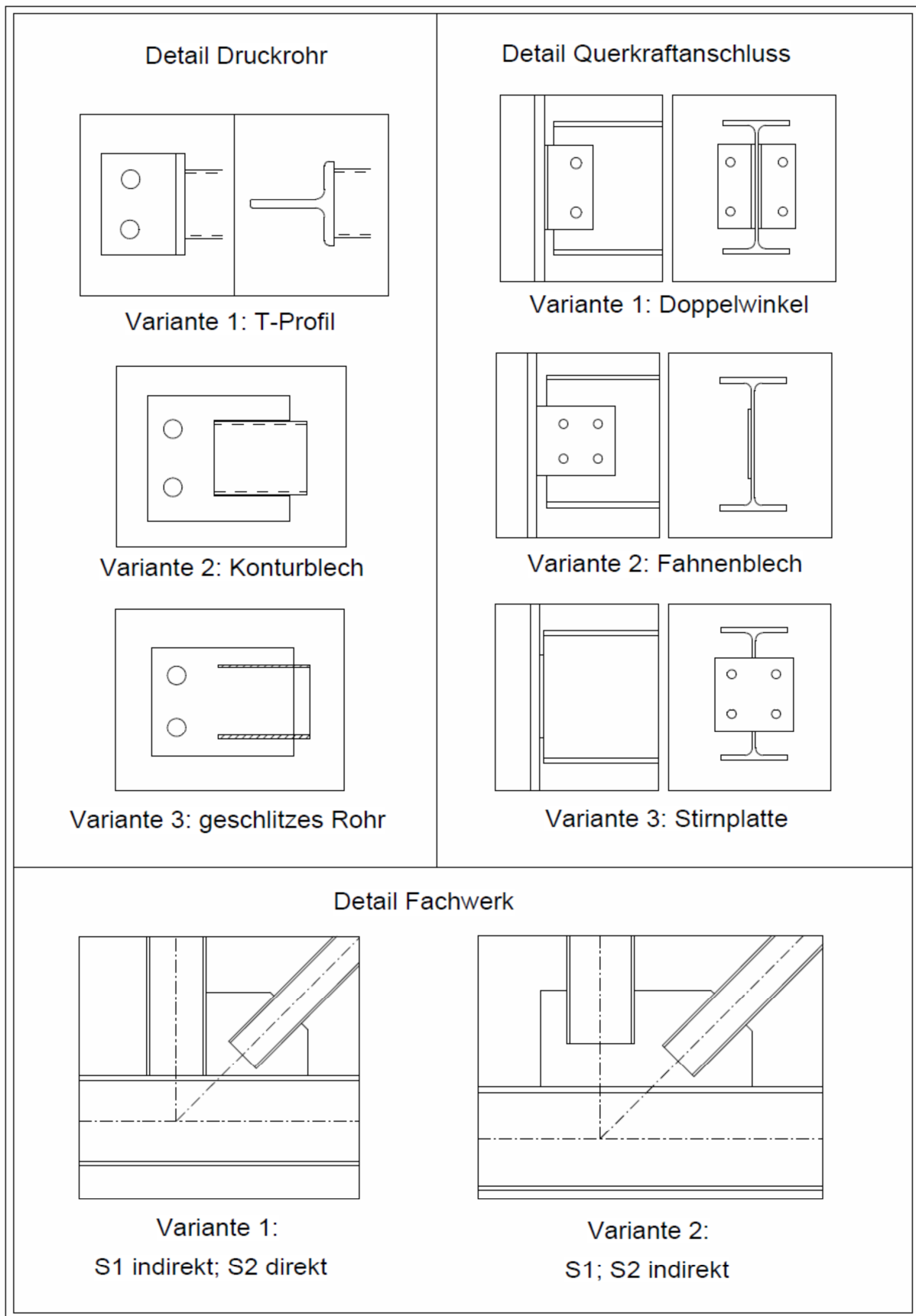


Abbildung 23: Darstellung der Konstruktionsvarianten der Anschlussdetails

3.3 Vorgehensweise

Aus der Kombination der einzelnen Variablen ergeben sich die zu untersuchenden Varianten. Aufgeführt sind die Varianten für den Druckrohranschluss in Tabelle 14; den Fachwerkknoten in Tabelle 15 und des Querkraftanschlusses in Tabelle 16.

Tabelle 14: Varianten des Details Druckrohr

Var.-Nr.	Variable 1 Detailausbildung	Variable 2 Druckkraft [kN]	Variable 3 Blech-Material
1	T-Profil-Anschluss	180	n.v.
2	T-Profil-Anschluss	140	n.v.
3	T-Profil-Anschluss	100	n.v.
4	Konturblech	180	S235
5	Konturblech	180	S355
6	Konturblech	140	S235
7	Konturblech	140	S355
8	Konturblech	100	S235
9	Konturblech	100	S355
10	geschlitztes Rohr	180	S235
11	geschlitztes Rohr	180	S355
12	geschlitztes Rohr	140	S235
13	geschlitztes Rohr	140	S355
14	geschlitztes Rohr	100	S235
15	geschlitztes Rohr	100	S355
n.v. = nicht vorhanden			

Tabelle 15: Varianten des Details Fachwerkknoten

Var.-Nr.	Variable 1 Normalkraft ¹ [kN]	Variable 2 Detail-ausbildung ²	Variable 3 Blech-Material
1	F1=700; F2=495	S2 direkt	S235
2	F1=700; F2=495	S2 direkt	S355
3	F1=600; F2=424	S2 direkt	S235
4	F1=600; F2=424	S2 direkt	S355
5	F1=500; F2=353	S2 direkt	S235
6	F1=500; F2=353	S2 direkt	S355
7	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S235
8	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S355
9	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S235
10	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S355
11	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S235
12	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S355
¹ F1 $\hat{=}$ Zug; F2 $\hat{=}$ Druck; F3 = 2800 kN $\hat{=}$ Zug; F4 ergibt sich aus der geometrischen Addition der anderen Kräfte			
² Beim indirekten Anschluss werden die Kräfte mittels eines Knotenbleches übertragen			

Tabelle 16: Varianten des Details Querkraftanschluss

Var.- Nr.	Variable 1 Querkraft [kN]	Variable 2 Detail-ausbildung	Variable 3 Blech-Material
1	150 kN	Doppelwinkel	n.v.
2	100 kN	Doppelwinkel	n.v.
3	70 kN	Doppelwinkel	n.v.
4	150 kN	Fahnenblech	S355
5	100 kN	Fahnenblech	S235
6	70 kN	Fahnenblech	S355
7	150 kN	Stirnplatte	S235
8	100 kN	Stirnplatte	S355
9	70 kN	Stirnplatte	S235
n.v. = nicht vorhanden			

Die aufgeführten Varianten werden gemäß dem Eurocode 3 berechnet. Mit der Berechnung wird die Tauglichkeit des Anschlusses nachgewiesen, die entsprechenden Kräfte zu übertragen (eine Alternative Variante ist die Zustimmung im Einzelfall). Weiterhin können aus der Berechnung die geometrischen Größen entnommen werden. Die Kostenermittlung besteht aus zwei Kategorien, den *Material-* und den *Bearbeitungskosten*. Ermittelt werden die Materialkosten mit den Volumen der Bauteile in einem betrachteten Bereich und den entsprechenden Materialkosten. Für die Ermittlung der Bearbeitungskosten wird die zur Herstellung notwendige Zeit der jeweiligen Station berechnet und mit den entsprechenden Stundensätzen zu einem Kostenwert umgewandelt. Die beiden Teilkosten werden zu Gesamtkosten addiert. Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Gesamtkostenermittlung. Im nächsten Schritt folgt der Vergleich der Varianten.

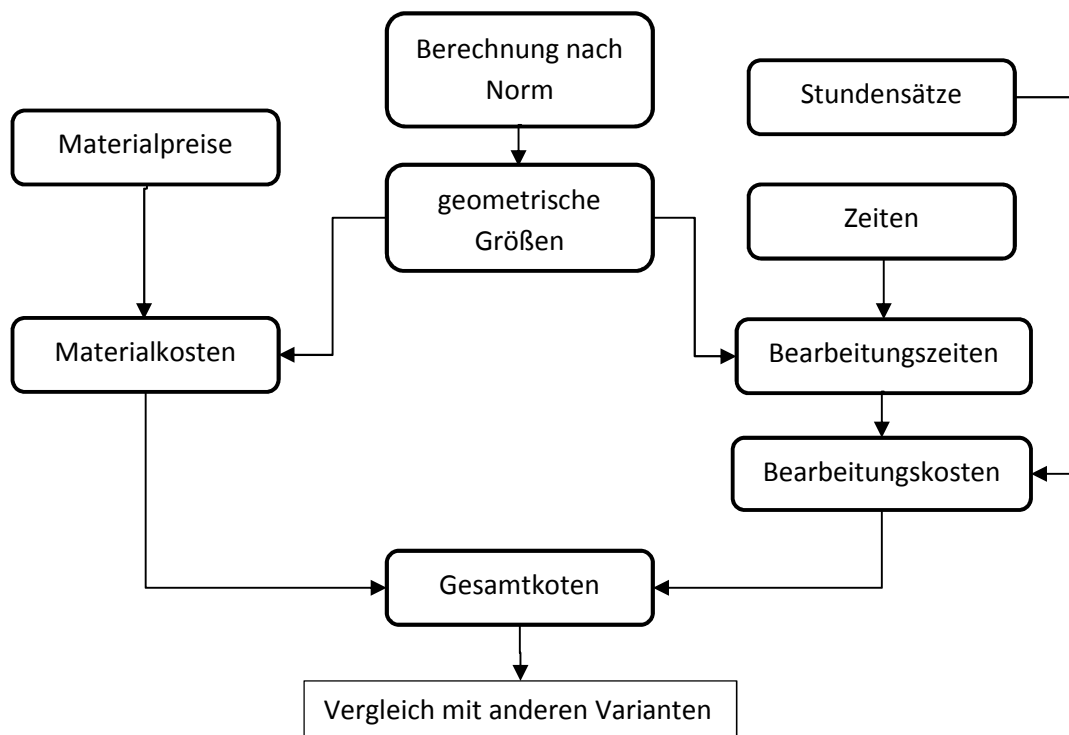


Abbildung 24: Ablauf der Gesamtkostenermittlung

3.4 Berechnung der Anschlüsse

3.4.1 Anmerkung zur Berechnung der Detailvarianten nach Eurocode 3

Die Dimensionierung und der Nachweis nach Norm ist ein iterativer Prozess. Dies bedeutet, dass die Abmessungen des Anschlusses zum Großteil vor dem Beginn der Berechnung und des Nachweises festgelegt werden. In der Regel führt dies dazu, dass Teilnachweise nicht erfüllt (Einwirkungen > Widerstandgrößen) bzw. unwirtschaftlich (Einwirkungen << Widerstandgrößen) werden. In diesen Fällen ist die Dimensionierung des Anschlusses zu ändern und der Nachweis erneut zu führen. Dieser Vorgang wiederholt sich bis alle Einzelnachweise erfüllt sind. Daraus ist abzuleiten, dass aus der Anwendung der Norm keine einmalige Ideallösung hervorgeht, sondern es im Ermessen des Anwenders liegt, welche Dimensionen angenommen oder korrigiert werden. Die in dieser Arbeit vorgenommene Berechnung stellt dementsprechend nur eine mögliche Lösung des Nachweisschemas dar.

Die Nachweisschemen in den Abschnitten 3.4.2 bis 3.4.8 nennen den jeweiligen Bereich bzw. nachzuweisende Element und das entsprechende in Abschnitt 2.2 enthaltene Nachweisschema.

3.4.2 Nachweisschema für Detail Druckrohr, Variante 1

In Abbildung 25 ist das Nachweisschema für den T-Profil-Anschluss dargestellt. Das zugehörige Berechnungsbeispiel ist im Abschnitt 443.6.1.1 aufgeführt.

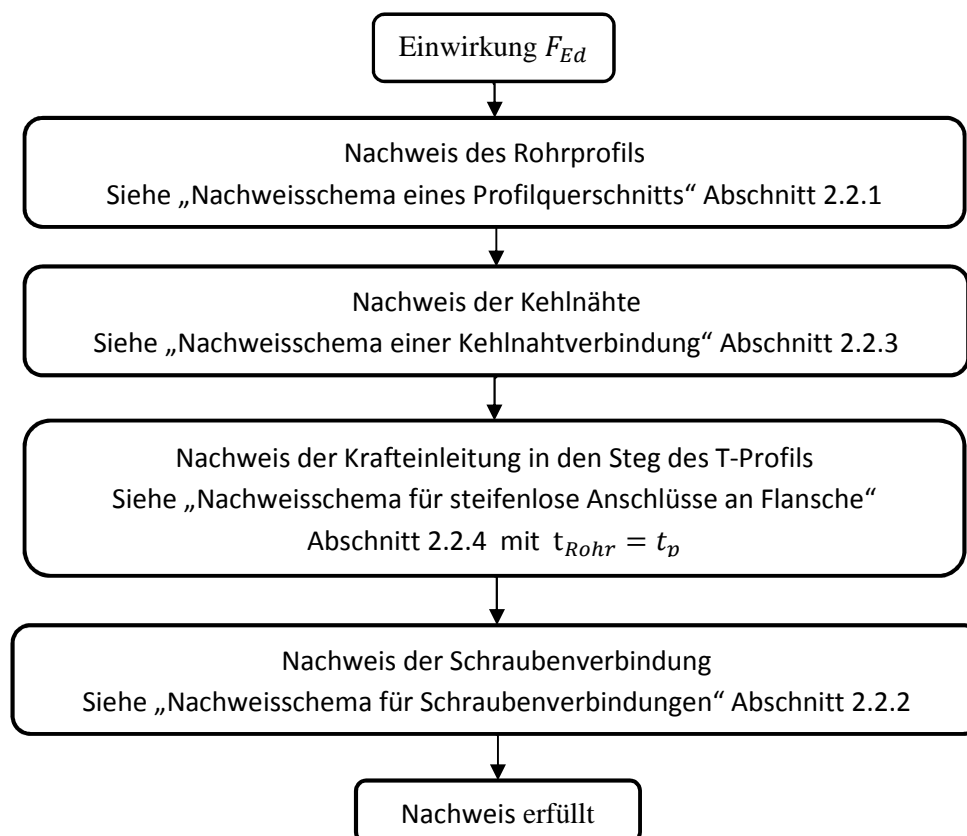


Abbildung 25: Nachweisschema Druckrohr: T-Profil

3.4.3 Nachweisschema für Detail Druckrohr, Variante 2 und 3

Das Nachweisschema von den Varianten Konturblech und geschlitzten Rohr ist in Abbildung 26 dargestellt. Die entsprechenden Berechnungsbeispiele sind im Abschnitt 3.6.1.2 für das Konturblech und 3.6.1.3 für das geschlitzte Rohr aufgeführt.

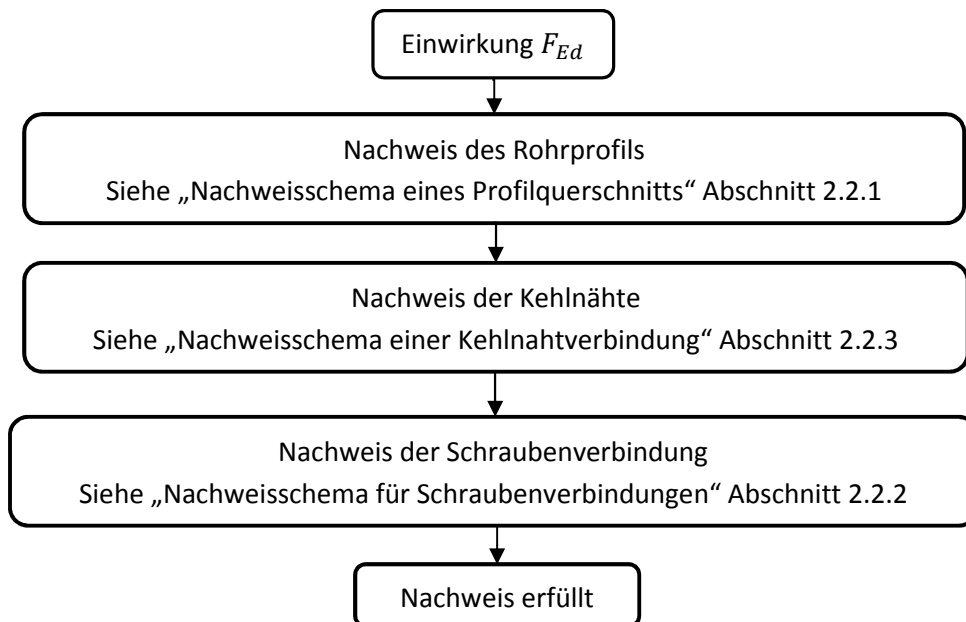


Abbildung 26: Nachweisschema Druckrohr: Konturblech; Geschlitztes Rohr

3.4.4 Nachweisschema für Detail Fachwerk, Variante 1

Das Nachweisschema für die Fachwerkknotenvariante mit direkten Anschluss des Stabes S2 an die Stäbe S3; S4 ist in Abbildung 27 dargestellt. Abschnitt 3.6.1.4 beinhaltet das zugehörige Berechnungsbeispiel.

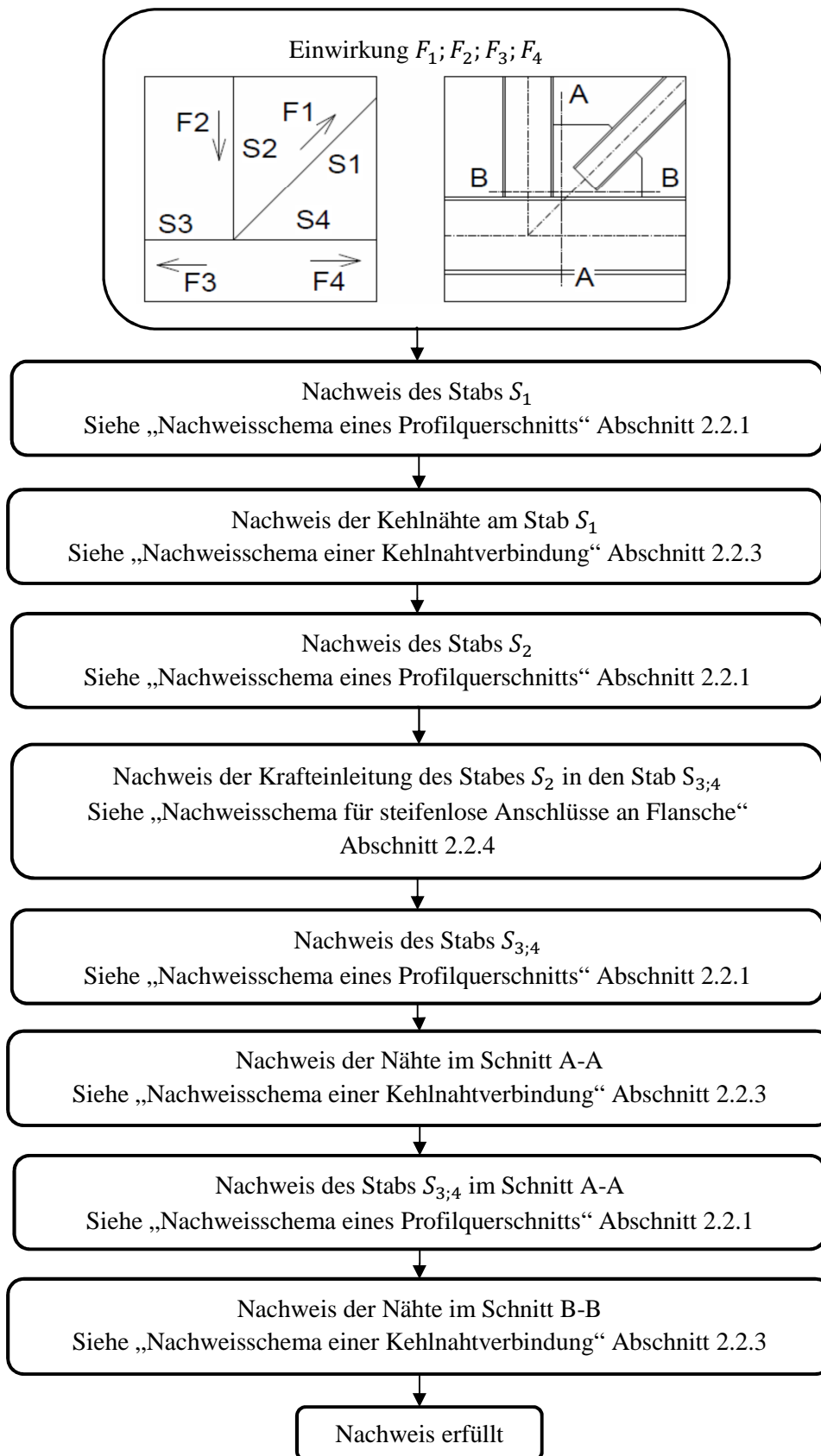


Abbildung 27: Nachweischema Fachwerk: S_1 indirekt; S_2 direkt angeschlossen

3.4.5 Nachweisschema für Detail Fachwerk, Variante 2

Das Nachweisschema für die Fachwerkknotenvariante mit indirektem Anschluss des Stabes S2 an die Stäbe S3; S4 ist in Abbildung 28 dargestellt. Abschnitt 3.6.1.5 zeigt ein Berechnungsbeispiel.

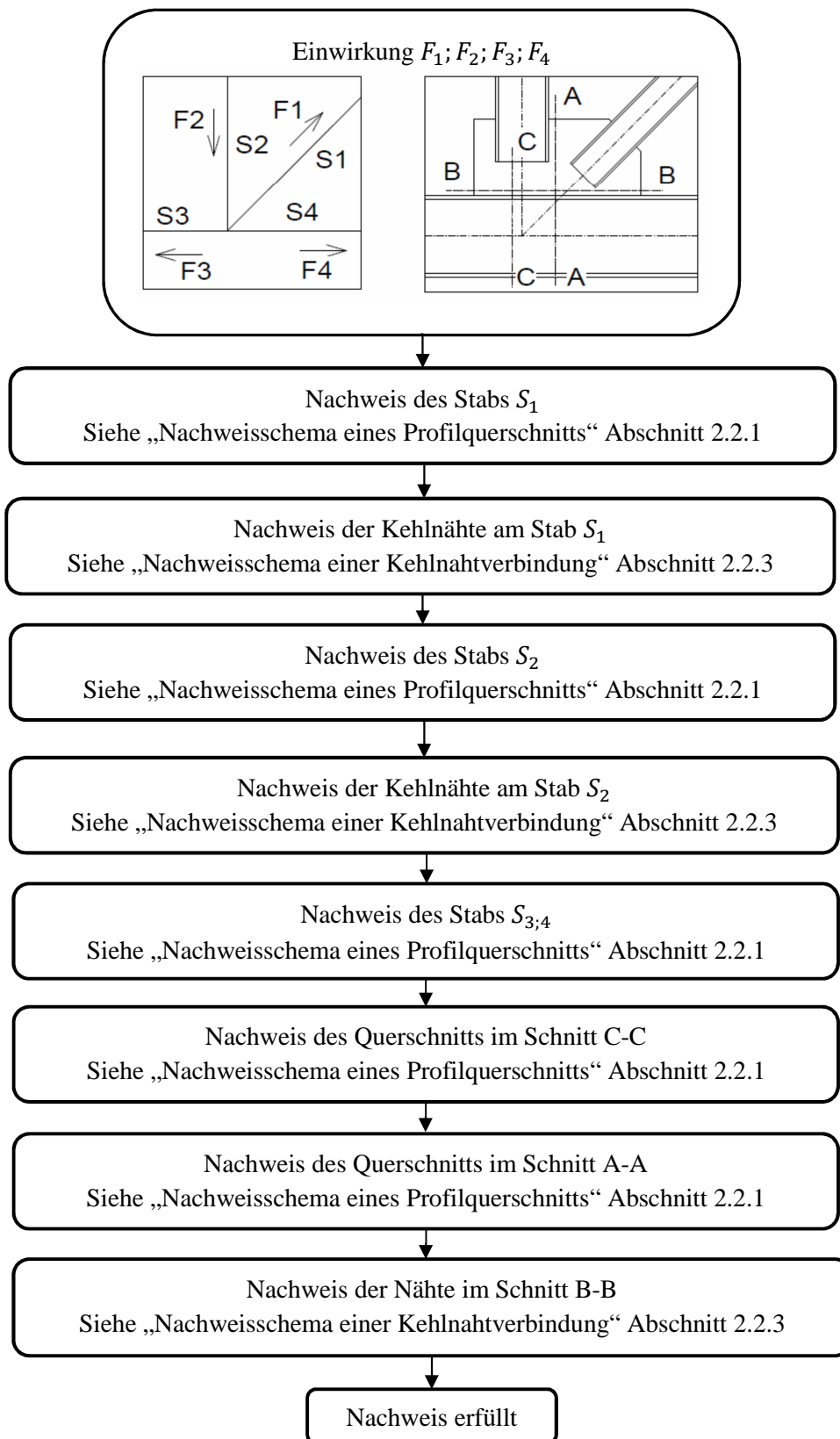


Abbildung 28: Nachweisschema Fachwerk: S1; S2 indirekt angeschlossen

3.4.6 Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 1

Das Nachweisschema für den Doppelwinkelanschluss ist in Abbildung 29 und das entsprechende Berechnungsbeispiel ist in Abschnitt 3.6.1.6 enthalten.

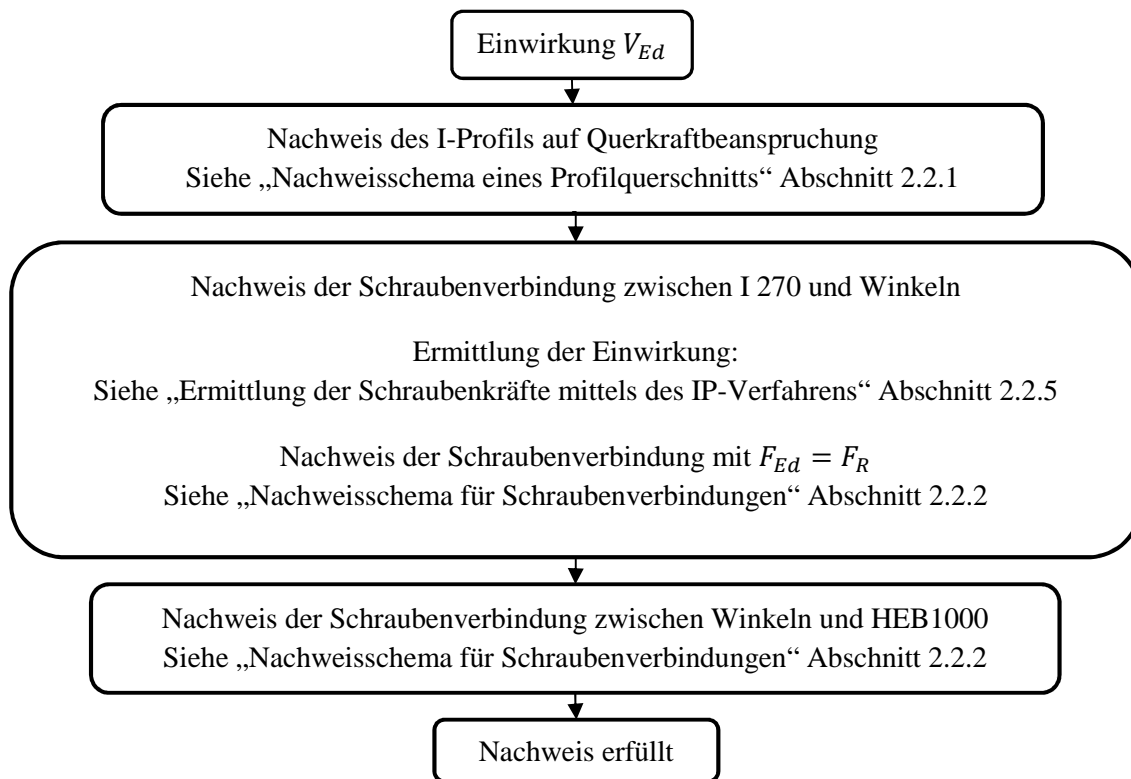


Abbildung 29: Nachweisschema Querkraft: Doppelwinkel

3.4.7 Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 2

In Abbildung 30 zeigt das Nachweisschema des Fahnenblechanschlusses. Das entsprechende Berechnungsbeispiel ist in Abschnitt 773.6.1.7 aufgeführt.

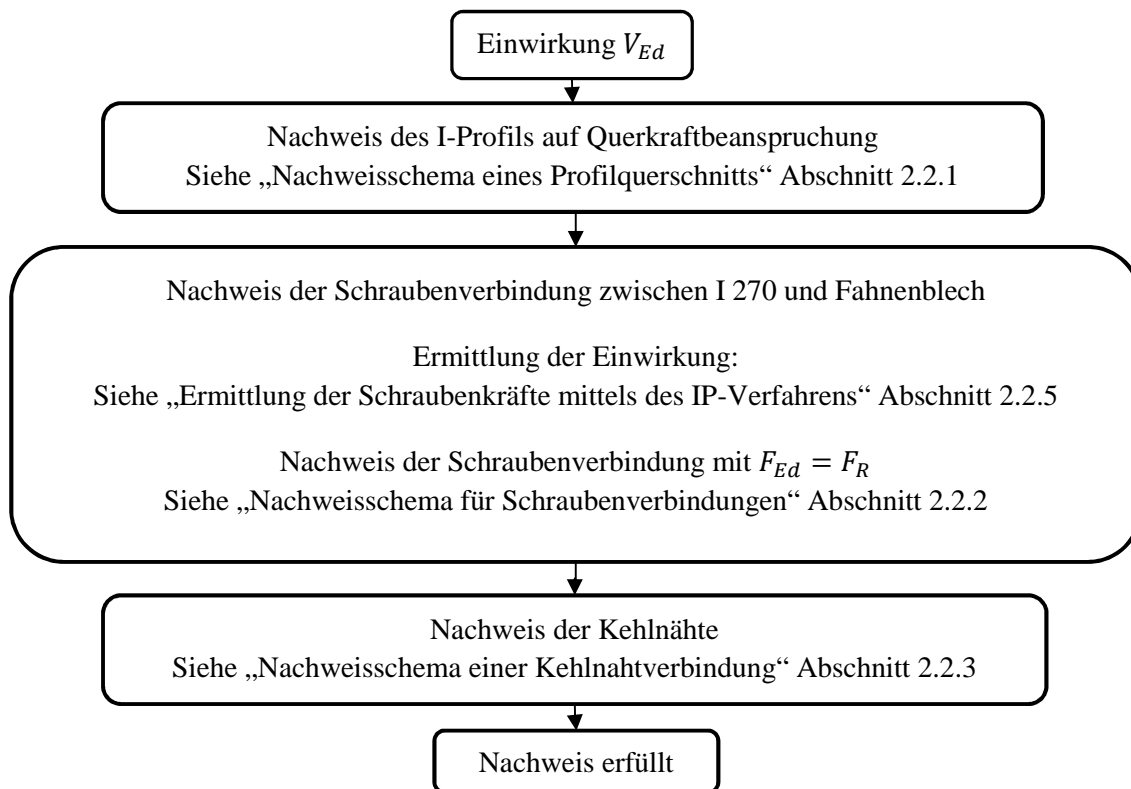


Abbildung 30: Nachweisschema Querkraft: Fahnenblech

3.4.8 Nachweisschema für Detail Querkraft, Variante 3

Das Nachweisschema für den Querkraftanschluss mit Stirnplatte ist in Abbildung 28 dargestellt. Abschnitt 3.6.1.8 zeigt ein Berechnungsbeispiel.

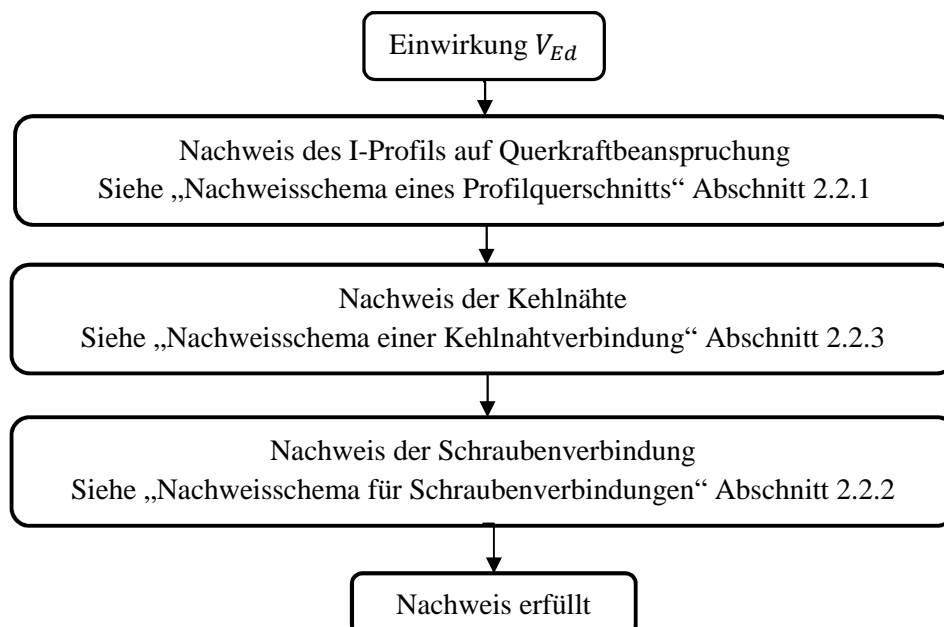


Abbildung 31: Nachweisschema Querkraft: Stirnplatte

3.5 Kostenermittlung

3.5.1 Berechnung der Materialkosten

Die Materialkosten werden über den Kilopreis ermittelt. Das Gewicht richtet sich dabei nach dem Halbzeug. Entsteht während der Fertigung Verschnitt ist dieser in der Berechnung zu ergänzen. Mit dem Volumen, dem Kilopreis und der Dichte kann der Preis berechnet werden.

Dichte des Stahls: $\varrho = 0,00785 \text{ kg/cm}^3$

- Profile

Die Größe der Anschlüsse hat einen Einfluss auf die Länge der Profile. Um dies zu berücksichtigen wurde ein Bereich festgelegt, in der die Profillänge ermittelt wird.

Tabelle 17: Betrachteter Bereich zur Volumenberechnung der Profile

Detail	Druckrohr	Fachwerk	Querkraftanschluss
Radius um Detail ¹ [cm]	15	65	30
¹ Mittelpunkt ist der Schnittpunkt der Systemachsen			

Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \varrho) * k_{Mat,Pr}$$

V_{Pr} = Profilvolumen im betrachteten Bereich; $k_{Mat,Pr}$ = Kilopreis der Materials

- Bleche

Die Berechnung der Bleche entspricht die der Profile und wird durch den Verschnittfaktor der Blechtafel ergänzt:

$$c_{Bl} = A_{Bl} * t_{Bl} * f_{vs} * \varrho * k_{Mat,Bl}$$

t_{Bl} = Blechdicke; A_{Bl} = Blechfläche; f_{vs} = Verschnittfaktor; $k_{Mat,Bl}$ = Kilopreis der Materials

- Nähte

Die Berechnung der Nähte wird ergänzt durch den Aufschlagsfaktor realer Nähte ergänzt:

$$c_{Naht} = V_{Naht} * f_{AN} * \varrho * k_{Mat,Naht}$$

V_{Naht} = Nahtvolumen; f_{AN} = Aufschlagsfaktor Naht; $k_{Mat,Naht}$ = Kilopreis der Materials

-Schrauben

Die Kosten richten sich nach Art und Zahl der Schrauben:

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk})$$

n_{schr} = Schraubenanzahl; k_{Stk} = Stückpreis einer Schraube

3.5.2 Fertigungskosten

Die Fertigungszeit berechnet sich nach dem Schema: Transportzeit + Hauptzeit + Nebenzeit. Dabei ist die Transportzeit auf die Losgröße der gemeinsam bearbeiteten Anschlüsse aufzuteilen. Die jeweiligen Fertigungskosten ergeben sich aus dem Produkt der Fertigungszeit und der Stundenkosten.

-Bohr-Säge-Automat und Bandsäge/Stanze

Die Berechnung der Profildbearbeitung beider Produktionswege ist identisch.

$$c_{BS} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nsä} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} + t_w + n_L * (t_{hbo} + t_{nbo}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,BS}$$

l = Losgröße; n_L = Anzahl Bohrungen; $k_{Betr,BS}$ = Betriebskosten je Stunde; t_{Tr} = Transportzeit; $t_{nsä}$ = Nebenzeit Sägen; t_{nbo} = Nebenzeit Bohren; t_w = Wechselzeit; t_{hbo} = Hauptzeit Bohren; s_{schn} = Schnittlänge; v_{schn} = Schnittgeschwindigkeit

- Plasmaanlage

Das Verteilen der Transport- und Ausrichtzeit der Blechtafel auf die einzelnen Bleche ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren nicht möglich. Mit der Größe des Bleches verringert sich tendenziell die Anzahl der möglichen Bleche, die aus einer Tafel hergestellt werden können. Um dies zu berücksichtigen, wird eine Näherungsformel angewendet.

$$l_{BT} = \frac{A_{BT} * 0,9}{A_{Bl} * f_{vs}}$$

l_{BT} = Losgröße der Bleche je Tafel; A_{BT} = Fläche der Blechtafel; f_{vs} = Verschnittfaktor
 A_{Bl} = Fläche des betrachteten Blechs

$$c_{Pl} = \left(\frac{t_{Tr}}{l_{BT}} + t_{npl} + t_{upl} * n_{l\ddot{o}} + \frac{s_{schn} + n_{l\ddot{o}} * U_{l\ddot{o}}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Pl}$$

$n_{l\ddot{o}}$ = Anzahl Löcher; $k_{Betr,Pl}$ = Betriebskosten je Stunde; t_{Tr} = Transportzeit;
 t_{npl} = Nebenzeit Plasmaschnitt; t_{upl} = Umsetzzeit Plasmaschnitt; $U_{l\ddot{o}}$ = Umfang Löcher;
 s_{schn} = Schnittlänge Blechkontur; v_{schn} = Schnittgeschwindigkeit

- Zusammenbau

Die Zusammenbaukosten werden wie folgt berechnet:

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) + t_{schl} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Zb}$$

n_{ht} = Anzahl zu heftende Teile; $k_{Betr,Zb}$ = Betriebskosten je Stunde; t_{Tr} = Transportzeit;
 l = Losgröße; t_{nzb} = Nebenzeit Zusammenbau; t_{hzb} = Hauptzeit Zusammenbau;
 t_{schl} = Schlitzzeit

- Schweißplatz

Die Schweißkosten werden wie folgt berechnet:

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) + t_{schl} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr, schw}$$

f_{nz} = Nebenzeitfaktor ; $k_{Betr, schw}$ = Betriebskosten je Stunde; t_{Tr} = Transportzeit;

l = Losgröße; t_{nschw} = Nebenzeit Schweißen; s_{Naht} = Nahtlänge;

v_{schw} = Schweißgeschwindigkeit

- Schraubenkosten bei der Montage

$$c_{schr} = \left(t_{ar} + \Sigma (n_{schr} * t_{ef}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr, schr}$$

n_{schr} = Schraubenanzahl; t_{ar} = Ausrichtzeit; t_{ef} = Einsetz- und Festziehzeit;

$k_{Betr.}$ = Betriebskosten je Stunde

3.5.3 Gesamtkosten

Die Gesamtkosten ist die Summe der Teilkosten.

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

Die Berechnungsbeispiele für die Kostenberechnung sind im Abschnitt 3.6.2 aufgeführt.

3.6 Rechnungsbeispiele

3.6.1 Nachweis der Anschlüsse und Berechnung geometrischer Größen

3.6.1.1 Rechnungsbeispiel 1) Druckrohr; Detail 1; $F_{Ed}=180\text{ N}$

1.) Nachweis des Rohrprofils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

Rohr 88,9x4,0 nach DIN EN 10210-2: $b=88,9\text{ mm}$, $t=4\text{ mm}$;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235\text{ N/mm}^2$, $f_u=360\text{ N/mm}^2$

$F_{Ed} = 180\text{ kN}$ (Druckkraft)

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$\frac{b}{t} = \frac{88,9}{4,0} = 22,3 < 50\epsilon^2 = 50 * 1^2 = 50 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

1.2.) Nachweis der Druckkraft

$A = 10,7\text{ cm}^2$ nach DIN EN 10216-2, Tab B.1;

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1070 * 235}{1,0} = 251450\text{ N} = 251,4\text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{c,Rd} = 180\text{ kN}/251,4\text{ kN} = \underline{0,71} < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

2.) Nachweis der Kehlnaht

2.1.) Nahtabmessungen

T 100 nach DIN EN 10055: $t_f = t_w = 11\text{ mm}$

$\min t = 4\text{ mm} \leq 4\text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$l_w = \pi * b = \pi * 88,9 = 279,2\text{ mm} \geq \begin{cases} 30\text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 3 = 18\text{ mm} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} a_w = 3\text{ mm} &\geq 3\text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 = \sqrt{11} - 0,5 = 2,81\text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 4 = 2,8 \approx 3\text{ mm} \end{aligned}$$

2.2.) Nachweis der Naht mittels des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.2

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1; $\alpha = 45^\circ$

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$A_w = \Sigma a_w * l_w = 0,3 * 27,9 = 8,37\text{ cm}^2$$

$$F_{\sigma\perp} = F_{Ed} * \sin \alpha = 180 * \sin 45^\circ = 127,3\text{ kN}$$

$$F_{\tau\perp} = F_{Ed} * \sin \alpha = 180 * \sin 45^\circ = 127,3\text{ kN}; F_{\tau\parallel} = 0$$

$$\sigma_{\perp} = F_{\sigma\perp}/A_w = 127,3/8,37 = 15,2\text{ kN/cm}^2;$$

$$\tau_{\perp} = F_{\sigma\perp}/A_w = 127,3/8,37 = 15,2\text{ kN/cm}^2; \tau_{\parallel} = 0$$

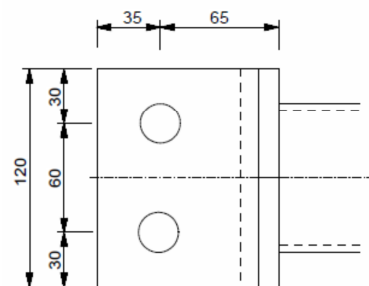
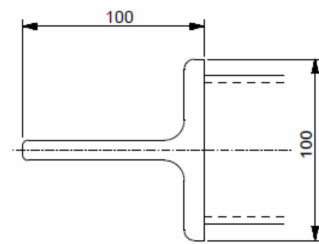


Abbildung 32: Abmessungen des Rechnungsbeispiels 1

Nachweise

$$\sigma_{\perp} = 15,2 \frac{kN}{cm^2} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} * \beta_{lw} = 0,9 * \frac{36}{1,25} * 1,0 = 25,92 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\sigma_{Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{15,2^2 + 3 * (15,2^2 + 0^2)} = 30,4 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{\beta_{lw} * f_u}{\beta_l * \gamma_{M2}} = \frac{1,0 * 36}{0,8 * 1,25} = 36 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 30,4 / 36,0 = 0,84 \leq 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.) Nachweis der Lasteinleitung

Aufgrund der Anschlussart ist ein Nachweis der Lasteinleitung in den Profilen nicht erforderlich.

3.) Nachweis der Krafteinleitung in den Steg des T-Profils

T 100 nach DIN EN 10055: $t_f = t_w = 11 \text{ mm}$; $s = r_1 = 11 \text{ mm}$; $b_p = 88,9 \text{ mm}$

$$f_{y,f} = f_y(T 100) = 235 \text{ N/mm}^2; f_{y,p} = f_y(Ro 88,9 * 4,0) = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{u,p} = f_u(Ro 88,9 * 4,0) = 360 \text{ N/mm}^2; t_p = t(Ro 88,9 * 4,0) = 4 \text{ mm}$$

Ermittlung der wirksamen Breite b_{eff}

$$k = \frac{t_f}{t_p} * \frac{f_{y,f}}{f_{y,p}} = \frac{11}{4} * \frac{235}{235} = 2,75 \leq 1,0 \rightarrow k = 1,0$$

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7k * t_f = 11 + 2 * 11 + 7 * 1,0 * 11 = 110 \text{ mm} \leq b(T 100) = 100 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 100 \text{ mm}$$

Eine unausgesteifte Krafteinleitung ist gewährleistet, falls die wirksame Breite größer der Breite des angeschlossenen Profils ist.

$$b_{eff} = 100 \text{ mm} \geq (f_{y,p} / f_{u,p}) b_p = (235 / 360) * 88,9 = 58 \text{ mm} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.) Nachweis der Schraubenverbindung

4.1.) Abmessungen

Nennlochspiel: $\Delta d = 2 \text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M20-4.6

$e_1 = 65 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$
$e_{1b} = 35 \text{ mm}$	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 11 + 40 = 84 \text{ mm}$
$e_2 = 30 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$
	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 11 + 40 = 84 \text{ mm}$
$p_2 = 60 \text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 22 = 52,8 \text{ mm}$
	$\leq 14t = 14 * 11 = 154 \text{ mm}$
	$\leq 200 \text{ mm}$

4.2.) Nachweis auf Abscherung

Schraubenzahl $n=2$

$$F_{v,Ed} = F_{Ed}/n = 180/2 = 90 \text{ kN}$$

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 20^2 = 314,1 \text{ mm}^2$$

Einreihiger Anschluss: $L_j < 15 * d$

f_{ub} nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; γ_{M2} nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 314}{1,25} = 90,4 \text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 90,4 * 1 = 90,4 \text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 90 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 90,4 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.3.) Nachweis auf Lochleibung

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{65}{3 * 22} = 0,98; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = 0,98; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,57$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7 = 2,8 * \frac{30}{22} - 1,7 = 2,11 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{60}{22} - 1,7 = 2,11 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,11$$

Einschnittiger Anschluss mit einem Schraubenpaar:

$$F_{b,Rd} = \min \begin{cases} \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,11 * 0,98 * 36 * 2,0 * 1,1}{1,25} = 131 \text{ kN} \\ 1,5 * \frac{f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 1,5 * \frac{36 * 2,0 * 1,1}{1,25} = 95,0 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{b,Rd} = 95,0 \text{ kN}$$

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 90 \text{ kN} \leq F_{b,Rd} = 95 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.4. Nachweis der Lasteinleitung

Aufgrund der vorhandenen Druckspannung im Anschluss mit einem Schraubenpaar ist ein Nachweis der Lasteinleitung nicht erforderlich

5.) Berechnung geometrischer Größen

5.1.) Volumen der Profile

$$A_{T100} = 20,9 \text{ cm}^2; A_{Rohr} = 10,7 \text{ cm}^2$$
$$V_{T100} = A_{T100} * l_T = 20,9 * 12 = 250,8 \text{ cm}^3$$

$$l_r = 15 - e_1 = 15 - 6,5 = 8,5 \text{ cm}$$
$$V_{Rohr} = A_{Rohr} * l_R = 10,7 * 8,5 = 90,9 \text{ cm}^3$$

$$V = V_{T100} + V_{Rohr} = 250,8 + 90,9 = 341,7 \text{ cm}^3$$

5.2.) Nahtlänge und -volumen

$$l_w = 279,2 \text{ mm}; a_w = 3 \text{ mm}$$

$$V_w = l_w * a_w^2 = 27,9 * 0,3^2 = 2,51 \text{ cm}^3$$

3.6.1.2 Rechnungsbeispiel 2) Druckrohr; Detail 2; $F_{Ed}=180 \text{ kN}$; Blech aus S355

1.) Nachweis des Rohrprofils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

Rohr 88,9x4,0 nach DIN EN 10210-2: $b=88,9 \text{ mm}$, $t=4 \text{ mm}$;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235 \text{ N/mm}^2$, $f_u=360 \text{ N/mm}^2$

$F_{Ed} = 180 \text{ kN}$ (Druckkraft)

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$\frac{b}{t} = \frac{88,9}{4,0} = 22,3 < 50\epsilon^2 = 50 * 1^2 = 50 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

1.2.) Nachweis der Druckkraft

$A = 10,7 \text{ cm}^2$ nach DIN EN 10216-2, Tab B.1;

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1070 * 235}{1,0} = 251450 \text{ N} = 251,4 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{c,Rd} = 180 \text{ kN}/251,4 \text{ kN} = \underline{0,71} < \underline{1,0} \text{ Nachweis erfüllt}$$

2.) Nachweis der Kehlnaht

2.1.) Nahtabmessungen

Blech $t=10*140*165$ mm

$\min t = 4\text{ mm} \leq 4\text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$l_w = l = 90\text{ mm} \geq \begin{cases} 30\text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 3 = 18\text{ mm} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} a_w = 3\text{ mm} &\geq 3\text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{11} - 0,5 = 2,81\text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 4 = 2,8 \approx 3\text{ mm} \end{aligned}$$

2.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$A_w = \Sigma a_w * l_w = 4 * 0,3 * 9 = 12\text{ cm}^2$$

$$F_{\sigma\perp} = 0; F_{\tau\perp} = 0; F_{\tau\parallel} = F_{Ed} = 180\text{ kN}$$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma\perp}^2 + F_{\tau\perp}^2 + F_{\tau\parallel}^2} = \frac{1}{4 * 9} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 180^2} = 5,0\text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7\text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,3 * 20,7 = 6,21\text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 5,0\text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 6,21 * 1,0 = 6,21\text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.) Nachweis der Lasteinleitung im Druckrohr

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$A_{Rohr} = 10,7\text{ cm}^2 \text{ nach DIN EN 10216-2, Tab B.1; } s = t_{bl} = 1\text{ cm}$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * l_w * \sin 30^\circ + s) = 2 * (2 * 9 * \sin 30^\circ + 1) = 20\text{ cm}$$

$$A = \min\{t * l_{riss} = 0,4 * 20 = 8\text{ cm}^2; A_{Rohr} = 10,7\text{ cm}^2\}$$

$$A = 8\text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{8 * 23,5}{1,00} = 188\text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 180\text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 188\text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.) Nachweis der Schraubenverbindung

3.1.) Abmessungen

Nennlochspiel: $\Delta d = 2 \text{ mm}$; Stahlsorte: S355 nach DIN EN 10025-2; M16-10.9

$e_1 = 45 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$
$e_{1b} = 30 \text{ mm}$	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$e_2 = 35 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$
	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$p_2 = 70 \text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 18 = 43,2 \text{ mm}$
	$\leq 14t = 14 * 10 = 140 \text{ mm}$
	$\leq 200 \text{ mm}$

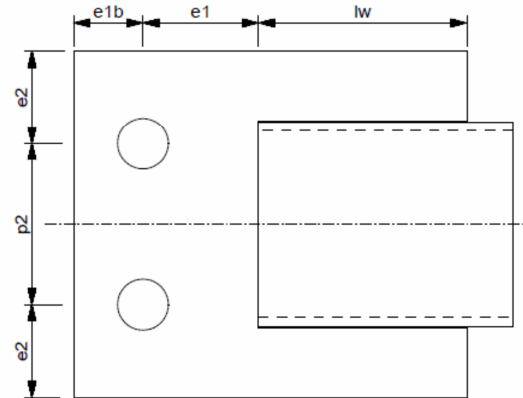


Abbildung 33: Abmessungen Konturblech

3.2.) Nachweis auf Abscherung

Schraubenanzahl $n=2$

$$F_{v,Ed} = F_{Ed}/n = 180/2 = 90 \text{ kN}$$

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 16^2 = 201 \text{ mm}^2$$

Einreihiger Anschluss: $L_j < 15 * d$

f_{ub} nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; γ_{M2} nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 1000 * 201}{1,25} = 150796 \text{ N} = 96,4 \text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 96,4 * 1 = 96,4 \text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 90 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 96,4 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.3.) Nachweis auf Lochleibung

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{45}{3 * 18} = 0,83; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{1000}{360} = 2,77$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = 0,92; \frac{f_{ub}}{f_u} = 2,77; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,92$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{35}{18} - 1,7 = 3,74 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{70}{18} - 1,7 = 3,74 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

Einschnittiger Anschluss mit einem Schraubenpaar:

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,83 * 49 * 1,6 * 1,0}{1,25} = 130 \text{ kN} \right.$$

$$\left. 1,5 * \frac{f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 1,5 * \frac{49 * 1,6 * 1,0}{1,25} = 94,0 \text{ kN} \right.$$

$$F_{b,Rd} = 94 \text{ kN}$$

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 90 \text{ kN} \leq F_{b,Rd} = 94 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

----- Linie 1
 - - - - - Linie 2
 - - - - - Linie 3

3.4. Nachweis der Lasteinleitung

Linie 1:

$$A_{nt} = 2 * 1,0 * 2,5 = 5 \text{ cm}^2; A_{nv} = 0$$

$$\gamma_{M0} = 1,00 \text{ nach EN 1993-1-1, 6.1}$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{49 * 5,0}{1,25} + 0 = 196 \text{ kN}$$

Linie 2:

$$A_{nt} = 2 * 1,0 * (3,5 - 0,9) = 5,2 \text{ cm}^2;$$

$$A_{nv} = 2 * 1,0 * (4,5 - 0,9) = 7,2 \text{ cm}^2$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{49 * 5,2}{1,25} + \frac{35,5 * 7,2}{\sqrt{3} * 1,0} = 351 \text{ kN}$$

Linie 3:

$$A_{nt} = 0$$

$$A_{nv} = 2 * 1,0 * (4,5 + 3,0 - 1,8) = 11,7 \text{ cm}^2$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = 0 + \frac{35,5 * 11,7}{\sqrt{3} * 1,0} = 239 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 180 \text{ kN} \leq \min \{V_{eff,Rd}\} = 196 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

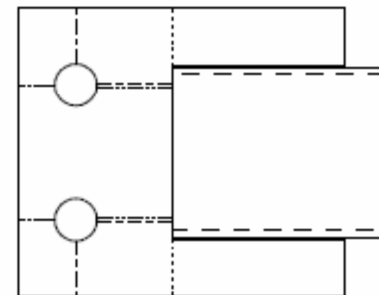


Abbildung 34: mögliche Risslinien im Kon-turblech

5.) Berechnung geometrischer Größen

5.1.) Nahtlänge und -volumen

$$l_w = 70 \text{ mm}; a_w = 3 \text{ mm}; n = 4$$

$$\Sigma l_w = l_w * n = 7 * 4 = 28 \text{ cm}$$

$$V_w = \Sigma l_w * a_w^2 = 28 * 0,3^2 = 3,24 \text{ cm}^3$$

5.2.) Volumen der Halbzeuge

$$A_{Rohr} = 10,7 \text{ cm}^2; \text{Blech } t=10*140*165 \text{ mm}$$

$$U_{Bl} = 2 * (b + l + l_w) = 2 * (14 + 16,5 + 7) = 75 \text{ cm}$$

$$U_{loch} = d_0 * \pi = 1,8 * \pi = 5,6 \text{ cm}$$

$$A_{Bl} = b * l - 9 * l_w = 14 * 16,5 - 9 * 7 = 168 \text{ cm}^2$$

$$l_r = 15 - e_1 = 15 - 4,5 = 10,5 \text{ cm}$$

$$V_{Rohr} = A_{Rohr} * l_R = 10,7 * 10,5 = 112,3 \text{ cm}^3$$

3.6.1.3 Rechnungsbeispiel 3) Druckrohr; Detail 3; $F_{Ed}=140 \text{ kN}$; Blech aus S235

1.) Nachweis des Rohrprofils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

Rohr 88,9x4,0 nach DIN EN 10210-2: $b=88,9 \text{ mm}$, $t=4 \text{ mm}$;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235 \text{ N/mm}^2$, $f_u=360 \text{ N/mm}^2$

$F_{Ed} = 140 \text{ kN}$ (Druckkraft)

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$\frac{b}{t} = \frac{88,9}{4,0} = 22,3 < 50\epsilon^2 = 50 * 1^2 = 50 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

1.2.) Nachweis der Druckkraft

$A = 10,7 \text{ cm}^2$ nach DIN EN 10216-2, Tab B.1;

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1070 * 235}{1,0} = 251450 \text{ N} = 251,4 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{c,Rd} = 140 \text{ kN} / 251,4 \text{ kN} = 0,55 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt}$$

2.) Nachweis der Kehlnaht

2.1.) Nahtabmessungen

Blech $t=10*120*140 \text{ mm}$

$\min t = 4 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$l_w = l = 75 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 3 = 18 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} a_w = 3 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 = \sqrt{11} - 0,5 = 2,81 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 4 = 2,8 \approx 3 \text{ mm} \end{aligned}$$

2.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$A_w = \Sigma a_w * l_w = 4 * 0,3 * 7,5 = 9 \text{ cm}^2$$

$$F_{\sigma \perp} = 0; F_{\tau \perp} = 0; F_{\tau \parallel} = F_{Ed} = 140 \text{ kN}$$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma \perp}^2 + F_{\tau \perp}^2 + F_{\tau \parallel}^2} = \frac{1}{4 * 7,5} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 140^2} = 4,66 \text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,3 * 20,7 = 6,21 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 4,66 \text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 6,21 * 1,0 = 6,21 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.) Nachweis der Lasteinleitung im Druckrohr

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30°:

$$A_{Rohr} = 10,7 \text{ cm}^2 \text{ nach DIN EN 10216-2, Tab B.1}$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * l_w * \sin 30^\circ) = 2 * (2 * 7,5 * \sin 30^\circ) = 15 \text{ cm}$$

$$A = \min\{t * l_{riss} = 0,4 * 15 = 6,0 \text{ cm}^2; A_{Rohr,net} = 10,7 - 2 * 0,4 * 1,0 = 9,9 \text{ cm}^2\}$$

$$A = 6,0 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6,0 * 23,5}{1,00} = 141 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 140 \text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 141 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.) Nachweis der Schraubenverbindung

3.1.) Abmessungen

Nennlochspiel: $\Delta d = 2 \text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M20-4.6

Aus konstruktiven Gründen ist $a = e_{1b} + 5 \text{ mm}$

$e_1 = 110 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$
$e_{1b} = 30 \text{ mm}$	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$e_2 = 30 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$
	$\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$p_2 = 60 \text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 22 = 52,8 \text{ mm}$
	$\leq 14t = 14 * 10 = 140 \text{ mm}$
	$\leq 200 \text{ mm}$

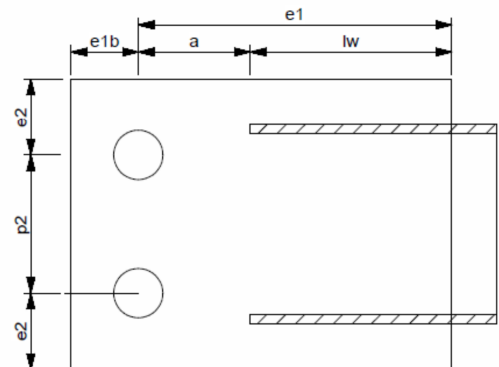


Abbildung 35: Lochabmessungen des Konturblechs

3.2.) Nachweis auf Abscherung

Schraubenanzahl $n=2$

$$F_{v,Ed} = F_{Ed}/n = 140/2 = 70 \text{ kN}$$

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 20^2 = 314 \text{ mm}^2$$

Einreihiger Anschluss: $L_j < 15 * d$

f_{ub} nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; γ_{M2} nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 314}{1,25} = 90432 \text{ N} = 90,4 \text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 90,4 * 1 = 90,4 \text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 70 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 90,4 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.3.) Nachweis auf Lochleibung

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_o} = \frac{110}{3 * 20} = 1,66; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = 1,66; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 1$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7 = 2,8 * \frac{30}{22} - 1,7 = 2,11 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7 = 1,4 * \frac{60}{22} - 1,7 = 2,11 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,11$$

Einschnittiger Anschluss mit einem Schraubenpaar:

$$F_{b,Rd} = \min \begin{cases} \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,11 * 1,0 * 36 * 20 * 1,0}{1,25} = 121 \text{ kN} \\ 1,5 * \frac{f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 1,5 * \frac{36 * 2,0 * 1,0}{1,25} = 86 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{b,Rd} = 86 \text{ kN}$$

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 70 \text{ kN} \leq F_{b,Rd} = 86 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.4. Nachweis der Lasteinleitung

Linie 1:

$$A_{nt} = 2 * (1,0 * 1,5 + 0,4 * 1,0 + 7,5 * \sin 30^\circ) = 11,3 \text{ cm}^2; A_{nv} = 0$$

$$\gamma_{M0} = 1,00 \text{ nach EN 1993-1-1, 6.1}$$

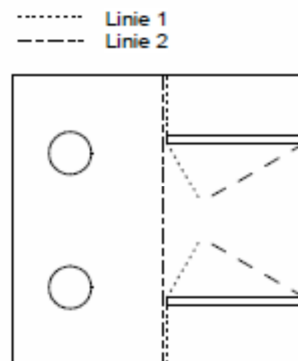
$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{36 * 11,3}{1,25} + 0 = 325 \text{ kN}$$

Linie 2:

$$A_{nt} = 14 * 1,0 = 14,0 \text{ cm}^2; A_{nv} = 0$$

$$\gamma_{M0} = 1,00 \text{ nach EN 1993-1-1, 6.1}$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{36 * 14,0}{1,25} + 0 = 403 \text{ kN}$$



Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 140 \text{ kN} \leq \min \{V_{eff,Rd}\} = 325 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Abbildung 36: Lage möglicher Risslinien

4.) Berechnung geometrischer Größen

4.1.) Nahtlänge und -volumen

$$l_w = 75 \text{ mm}; a_w = 3 \text{ mm}; n = 4$$

$$\Sigma l_w = l_w * n = 7,5 * 4 = 30 \text{ cm}$$

$$V_w = \Sigma l_w * a_w^2 = 30 * 0,3^2 = 2,7 \text{ cm}^3$$

4.2.) Volumen der Halbzeuge

$$A_{Rohr} = 10,7 \text{ cm}^2; \text{Blech } t=10*120*140 \text{ mm}$$

$$U_{Bl} = 2 * (b + l) = 2 * (12 + 14) = 52 \text{ cm}$$

$$U_{loch} = d_0 * \pi = 2,2 * \pi = 6,9 \text{ cm}$$

$$A_{Bl} = b * l = 12 * 14 = 168 \text{ cm}^2$$

$$l_r = 15 - a = 15 - 3,5 = 11,5 \text{ cm}$$

$$V_{Rohr} = A_{Rohr} * l_R = 10,7 * 11,5 = 123 \text{ cm}^3$$

3.6.1.4 Rechnungsbeispiel 4) Fachwerkknoten; Detail 1

$$F_1 = 700 \text{ kN}; F_2 = 495 \text{ kN}; F_3 = 2800 \text{ kN}; F_4 = 2305 \text{ kN}; \text{Knotenblech aus S235}$$

1.) Nachweis des Zugstabs S_1

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der reinen Zugbeanspruchung ist ein Nachweis der Querschnittsklasse nicht notwendig

1.2.) Nachweis der Zugkraft

$$\text{HEA 160: } A = 38,8 \text{ cm}^2 \text{ nach DIN EN 1025-3, Tab 1;}$$

$$\text{S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: } f_y=235 \text{ N/mm}^2, f_u=360 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)}$$

$$F_{Ed} = 700 \text{ kN (Zugkraft)}$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{38,8 * 235}{1,0} = 911,8 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{t,Rd} = 700 \text{ kN}/911,8 \text{ kN} = \underline{0,77 < 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

1.3.) Nachweis der Kehlnaht

1.3.1.) Nahtabmessungen

HEA 160 nach DIN EN 1025-3, Tab 1

$$t_w = 6 \text{ mm}; t_f = 9 \text{ mm}; r = 15 \text{ mm}$$

Blech $t=12 \times 330 \times 400 \text{ mm}$

$$\min t = 4 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$$

nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 4 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{12} - 0,5 \\ &= 2,96 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 9 = 8,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 250 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

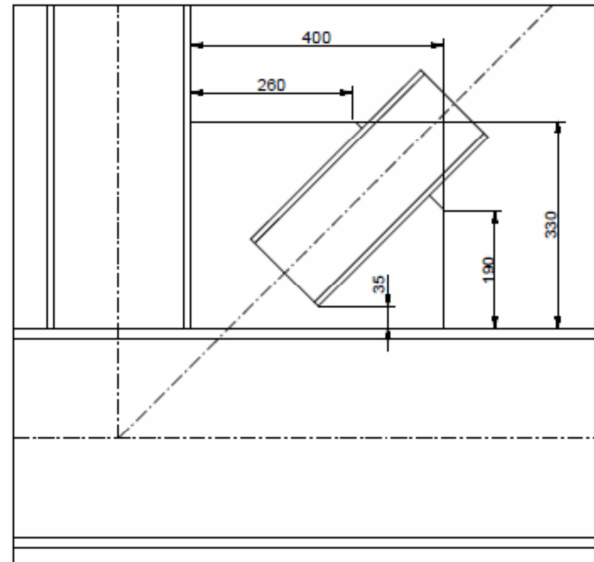


Abbildung 37: Abmessungen des Knotenblechs

1.3.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$F_{\sigma \perp} = 0; F_{\tau \perp} = 0; F_{\tau \parallel} = F_{Ed} = 700 \text{ kN}$$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma \perp}^2 + F_{\tau \perp}^2 + F_{\tau \parallel}^2} = \frac{1}{4 * 25} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 700^2} = 7,0 \text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,4 * 20,7 = 8,28 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 7,0 \text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 8,28 * 1,0 = 8,28 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

1.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im Knotenblech

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$l_{riss} = 2 * l_w * \sin 30^\circ + s = 2 * 25 * \sin 30^\circ + 0 = 25 \text{ cm}$$

$$A = t * l_{riss} = 1,2 * 25 = 30 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{30 * 23,5}{1,00} = 705 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 700 \text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 705 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

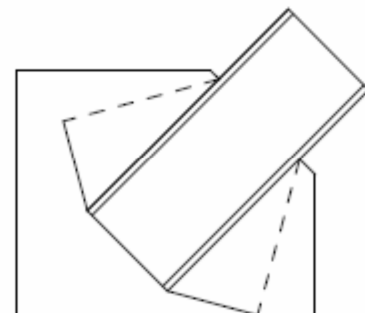


Abbildung 38: Risslinie unter 30° Lasteinleitung

1.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im HEA 160

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$A_{HEA\ 160} = 38,8\text{ cm}^2 \text{ nach DIN 1025-3, Tab.1; } s = t_{bl} = 1,2\text{ cm}$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * l_w * \sin 30^\circ + s + l_w * \sin 30^\circ)$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * 25 * \sin 30^\circ + 1,2 + 25 * \sin 30^\circ) = 52,4 + 25\text{ cm}$$

$$A = \min\{ t * l_{riss} = 0,9 * 52,4 + 0,6 * 25 = 62,1\text{ cm}^2; A_{Rohr} = 38,8\text{ cm}^2 \}$$

$$A = 38,8\text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{38,8 * 23,5}{1,00} = 911\text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 700\text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 911\text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.) Nachweis des Druckstabs S_2

2.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235\text{ N/mm}^2$, $f_u=360\text{ N/mm}^2$

$$F_{Ed} = 495\text{ kN (Druckkraft)}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

Gurt: einseitig gestützter Flansch nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

$$c = 0,5 * (240 - 2 * 21 - 7,5) = 95\text{ mm}; t = t_f = 12\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{95}{12} = 7,9 < 9\epsilon = 9 * 1,0 = 9 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

Steg: beidseitig gestützter Flansch nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

$$c = 230 - 2 * (17,5 + 21) = 153\text{ mm}; t = t_w = 10\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{153}{10} = 15,3 < 72\epsilon = 72 * 1,0 = 72 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

Gesamtquerschnittsklasse 1

2.2.) Nachweis der Druckkraft

$A = 76,8\text{ cm}^2$ nach DIN EN 1025-3, Tab 1;

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{76,8 * 23,5}{1,0} = 1805\text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{c,Rd} = 495\text{ kN}/1805\text{ kN} = \underline{0,3 < 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.) Nachweis der Krafteinleitung nach DIN EN 1993-1-8, 4.10

HEA 240 nach DIN EN 1025-3, Tab 1r = s = 21 mm

$$f_{y,f} = f_y(\text{HEA 360}) = 235 \text{ N/mm}^2; f_{y,p} = f_y(\text{HEA 240}) = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{u,p} = f_u(\text{HEA 240}) = 360 \text{ N/mm}^2; t_p = t_f(\text{HEA 240}) = 12 \text{ mm}$$

Ermittlung der wirksamen Breite b_{eff}

$$k = \frac{t_f}{t_p} * \frac{f_{y,f}}{f_{y,p}} = \frac{17,5}{12} * \frac{235}{235} = 1,45 \leq 1,0 \rightarrow k = 1,0$$

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7k * t_f = 10 + 2 * 21 + 7 * 1,0 * 17,5 = 174,5 \text{ mm} \leq b(\text{HEA 360}) = 300 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 174,5 \text{ mm}$$

Eine unausgesteifte Krafteinleitung ist gewährleistet, falls die wirksame Breite größer der Breite des angeschlossenen Profils ist.

$$b_{eff} = 174,5 \text{ mm} \geq (f_{y,p}/f_{u,p})b_p = (235/360) * 240 = 156 \text{ mm} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.) Nachweis der Gurtstäbe $S_3; S_4$

3.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der reinen Zugbeanspruchung ist ein Nachweis der Querschnittsklasse nicht notwendig

3.2.) Nachweis der Zugkraft

HEA 360: A = 143 cm² nach DIN EN 1025-3, Tab 1;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235 \text{ N/mm}^2$, $f_u=360 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$F_{3,Ed} = 2800 \text{ kN}$ (Zugkraft); $F_{4,Ed} = 2270 \text{ kN}$ (Zugkraft);

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{143 * 23,5}{1,0} = 3360 \text{ kN}$$

$$F_{3,Ed}/N_{t,Rd} = 2800 \text{ kN}/3360 \text{ kN} = 0,83 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4. Nachweis im Schnitt A-A

4.1.) Berechnung der Querschnittswerte

Flächenschwerpunkt:

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; A = 143 cm²; $I_x = 33090 \text{ cm}^4$

$$s_{A-A} = \frac{143 * 17,5 + 1,2 * 33 * (17,5 + 16,5)}{143 + 33 * 1,2} = 21,1 \text{ cm}$$

$$e_{A-A} = s_{A-A} - 17,5 = 21,1 - 17,5 = 3,6 \text{ cm}$$

$$I_{A-A} = 33090 + 3,6^2 * 143 + 1/12 * 33^3 * 1,2 + (17,5 + 16,5 - 21,1)^2 * 1,2 * 33 = 45126 \text{ cm}^4$$

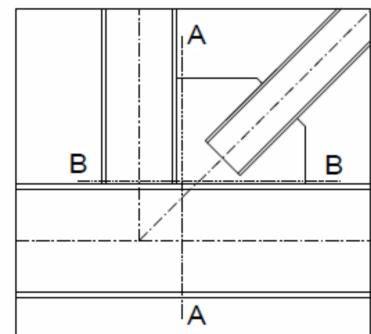


Abbildung 39: Verlauf der Schnitte A-A und B-B

4.2.) Einwirkungen

$$N_{Ed} = F_{S3} = 2800 \text{ kN}; V_{Ed} = F_{S2} = 495 \text{ kN}$$
$$M_{Ed} = N_{Ed} * e_{A-A} = 2800 * 3,6 = 10080 \text{ kNcm}$$

4.3.) Nachweis der Naht Bl12 an HEA 240

4.3.1.) Nahtabmessungen

HEA 240 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $t_f = 12 \text{ mm}$

Blech $t = 12 * 330 * 400 \text{ mm}$

$\min t = 4 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$a_w = 7 \text{ mm} \geq 3 \text{ mm}$$
$$\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{12} - 0,5 = 2,96 \text{ mm}$$
$$\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 12 = 8,4 \text{ mm}$$

$$l_w = 330 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

4.3.2.) Ermittlung der Spannungen

$$\alpha_1 = 45^\circ$$

$$A_w = \Sigma a_w * l_w = 2 * 0,6 * 33 = 39,6 \text{ cm}^2$$

$$F_{N,Bl} = \frac{N_{Ed} * A_{Bl}}{A_{Bl} + A_{HEA360}} = \frac{2800 * 1,2 * 33}{1,2 * 33 + 143} = 607 \text{ kN}$$

$$F_M = \frac{M_{Ed}}{I_{B-B}} * z * A_{Bl} = \frac{10080}{45126} * (17,5 + 16,5 - 21,1) * 1,2 * 33 = 114 \text{ kN}$$

$$F_{\sigma\perp} = (F_{N,Bl} + F_M) * \sin \alpha_1$$

$$F_{\sigma\perp} = (607 + 114) * \sin 45^\circ = 510 \text{ kN}$$

$$F_{\tau\perp} = (F_{Steg} + F_M) * \cos \alpha_1$$

$$F_{\tau\perp} = (607 + 114) * \cos 45^\circ = 510 \text{ kN}$$

$$F_{\tau\parallel} = V_{Ed} = 495 \text{ kN}$$

$$\sigma_{\perp} = F_{\sigma\perp} / A_w = 510 / 39,6 = 12,9 \text{ kN/cm}^2;$$

$$\tau_{\perp} = F_{\tau\perp} / A_w = 510 / 39,6 = 12,9 \text{ kN/cm}^2;$$

$$\tau_{\parallel} = F_{\tau\parallel} / A_w = 495 / 39,6 = 12,5 \text{ kN/cm}^2$$

4.3.3.) Nachweis der Naht mittels des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8,

4.5.3.2

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$\sigma_{\perp} = 12,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} * \beta_{lw} = 0,9 * \frac{36}{1,25} * 1,0 = 25,92 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\sigma_{Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{12,9^2 + 3 * (12,9^2 + 12,5^2)} = 33,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{\beta_{lw} * f_u}{\beta_l * \gamma_{M2}} = \frac{1,0 * 36}{0,8 * 1,25} = 36 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 33,7 / 36,0 = \underline{0,94 \leq 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.4.) Nachweis HEA 360

4.4.1.) Einwirkungen

$$F_{N,HEA 360} = \frac{N_{Ed} * A_{HEA 360}}{A_{Bl} + A_{HEA 360}} = \frac{2800 * 143}{1,2 * 33 + 143} = 2193 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 0 \text{ kN}; M_{Ed} = 10080 \text{ kNcm}$$

4.4.2.) Nachweis der Normalkraft

$$V_{Ed} / V_{c,Rd} = 0 \leq 0,5 \rightarrow \text{Abminderung von } N_{pl,Rd} \text{ nicht erforderlich}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{143 * 23,5}{1,0} = 3360 \text{ kN}$$

$$F_{N,HEA 360} / N_{pl,Rd} = 2193 \text{ kN} / 3360 \text{ kN} = \underline{0,65 < 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.4.3.) Nachweis des Biegemoments

$$M_{pl,y,Rd} = 490,7 \text{ kNm} = 49070 \text{ kNcm}$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 0,65; a = (A - 2b * t_f) / A = (143 - 2 * 30 * 1,75) / 143 = 0,26 \leq 0,5$$

$$M_{y,N,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} M_{pl,y,Rd} * \frac{1-n}{1-0,5*a} = 49070 * \frac{1-0,65}{1-0,5*0,26} = 19740 \text{ kNcm} \\ M_{pl,y,Rd} = 49070 \text{ kNcm} \end{array} \right.$$

$$M_{y,N,Rd} = 19740 \text{ kNcm}$$

Auf das Ansetzen des gesamten Querschnitts A-A wird an dieser Stelle verzichtet

$$M_{Ed} / M_{y,N,Rd} = 10080 / 19740 = 0,51 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.4.4.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \text{ mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}; f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 235} = 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{302}{10} = 30,2 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,0} = 72$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

5. Nachweis im Schnitt B-B

5.1.) Berechnung der Querschnittswerte der Naht

5.1.1.) Nahtabmessungen

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $t_f = 17,5 \text{ mm}$

Blech $t=12 \times 330 \times 400 \text{ mm}$

$\min t = 4 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 4 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{17,5} - 0,5 = 3,7 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 12 = 8,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 400 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

5.1.2.) Berechnung der Querschnittswerte

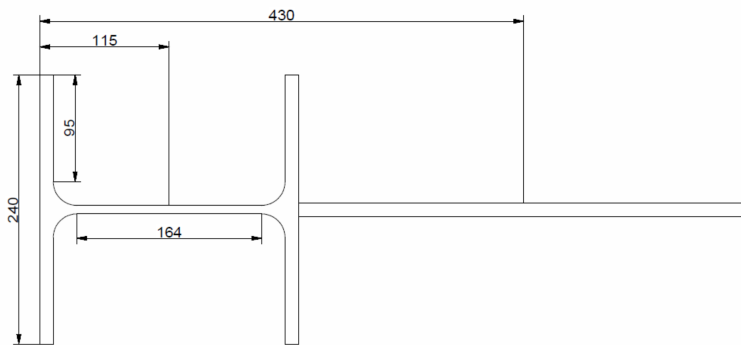


Abbildung 40: Abmessungen im Schnitt B-B

Flächenschwerpunkt:

$$\begin{aligned} \Sigma A_w * e &= 240 * 4 * 0 + 2 * 95 * 4 * 12 + 2 * 164 * 4 * 115 + 2 * 95 * 4 * (230 - 12) \\ &\quad + 240 * 4 * 230 + 2 * 4 * 400 * 430 \end{aligned}$$

$$\Sigma A_w * e = 1922480 \text{ cm}^3$$

$$\Sigma A_w = 2 * 240 * 4 + 4 * 95 * 4 + 2 * 164 * 4 + 2 * 400 * 4 = 7192 \text{ mm}^2$$

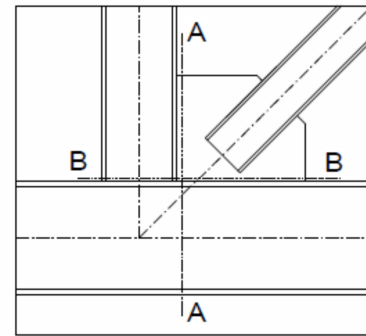
$$s_{B-B} = \frac{\Sigma A_w * e}{\Sigma A_w} = \frac{1922480}{7192} = 24,1 \text{ cm}$$

$$I_{\text{eigen}} = 1/12 * 2 * 0,4 * 16,4^3 + 1/12 * 2 * 0,4 * 40^3 = 4560 \text{ cm}^4$$

$$\begin{aligned} I_{\text{steiner}} &= 24,1^2 * 0,4 * 24 + (24,1 - 1,2)^2 * 2 * 9,5 * 0,4 + (24,1 - 11,5)^2 * 2 * 0,4 * 16,4 \\ &\quad + (24,1 - 23 + 1,2)^2 * 2 * 0,4 * 9,5 + (24,1 - 23)^2 * 0,4 * 24 + (43 - 24,1)^2 * 2 * 0,4 * 40 \end{aligned}$$

$$I_{\text{steiner}} = 23126 \text{ cm}^4$$

$$I_{B-B} = I_{\text{eigen}} + I_{\text{steiner}} = 4560 + 23126 = 27687 \text{ cm}^4$$



Verlauf der Schnitte A-A und B-B

5.2.) Einwirkungen

$$N_{Ed} = 0 \text{ kN};$$

$$V_{Ed} = F_{S1} * \cos 45^\circ = 700 * \cos 45^\circ = 495 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = V_{Ed} * e_{HEA 360} = 495 * 35/2 = 8662 \text{ kNcm}$$

5.3.) Nachweis der Naht

5.3.1.) Nahtabmessungen

HEA 240 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $t_w = 7,5 \text{ mm}$; $t_f = 12 \text{ mm}$; $r = 21 \text{ mm}$

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $t_w = 10 \text{ mm}$; $t_f = 17,5 \text{ mm}$; $r = 21 \text{ mm}$

$\min t = 7,5 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

Stegnaht

$$\begin{aligned} a_w = 4 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{17,5} - 0,5 = 3,68 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 10 = 7,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

Gurtnaht

$$\begin{aligned} a_w = 4 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{17,5} - 0,5 = 3,68 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 12 = 8,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Nahtlänge:

$$\begin{aligned} l_w(\text{Steg}) &= 164 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases} \\ l_w(\text{Gurt, Außen}) &= 240 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases} \\ l_w(\text{Gurt, Innen}) &= 95 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned}$$

5.3.2.) Ermittlung der Spannungen

$$\alpha_1 = 45^\circ$$

$$\sigma_M = \frac{M_{Ed}}{I_{B-B}} * z_{\max} = \frac{8662}{27687} * (23 + 40 - 24,1) = 12,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{\perp} = \sigma_M * \sin 45^\circ = 12,2 * \sin 45^\circ = 8,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_M * \cos 45^\circ = 12,2 * \cos 45^\circ = 8,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = V_{Ed} / A_{w,\parallel} = 495 / (2 * 0,4 * (16,4 + 40)) = 10,97 \text{ kN/cm}^2$$

5.3.3.) Nachweis Naht mittels des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.2

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$\sigma_{\perp} = 8,6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} * \beta_{lw} = 0,9 * \frac{36}{1,25} * 1,0 = 25,92 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\sigma_{Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{8,6^2 + 3 * (8,6^2 + 11^2)} = 26,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{\beta_{lw} * f_u}{\beta_l * \gamma_{M2}} = \frac{1,0 * 36}{0,8 * 1,25} = 36 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 26,5 / 36,0 = \underline{0,73 \leq 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

5.4.) Nachweis des Knotenblechs gegen Schubbeulen

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \quad \text{mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}; f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 235} = 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{400}{12} = 33 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,0} = 72$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

6.) Berechnung geometrischer Größen

6.1.) Nahtlänge und -volumen

Anschluss S_1

$$l_{w,S_1} = l_w * n = 4 * 25 = 100 \text{ cm}$$

$$V_{w,S_1} = \Sigma l_w * a_w^2 = 100 * 0,4^2 = 16 \text{ cm}^3$$

Schnitt A-A

$$l_{w,A-A} = 33 \text{ mm}; a_w = 6 \text{ mm}; n = 2$$

$$\Sigma l_{w,A-A} = l_{w,A-A} * n = 33 * 2 = 66 \text{ cm}$$

$$V_{w,A-A} = \Sigma l_w * a_w^2 = 66 * 0,6^2 = 23,8 \text{ cm}^3$$

Schnitt B-B

$$l_{w,B1} = 400 \text{ mm}; a_w = 4 \text{ mm}; n = 2$$

$$l_{w,Gurt,HEA240} = 240 + 1,2 \text{ mm (beinhaltet rechnerisch nichttragende Nähte aus Umschweißung)}$$

$$a_w = 4 \text{ mm}; n = 4$$

$$l_{w,Steg,HEA240} = 16,4 \text{ mm}; a_w = 4 \text{ mm}; n = 2$$

$$\Sigma l_{w,B-B} = l_w * n = 40 * 2 + 25,2 * 4 + 16,4 * 2 = 213,6 \text{ cm}$$

$$V_{w,B-B} = \Sigma l_w * a_w^2 = 2 * 40 * 0,4^2 + 25,2 * 4 * 0,4^2 + 16,4 * 2 * 0,4^2$$

$$V_{w,B-B} = 34,2 \text{ cm}^3$$

$$l_{w,a3} = 0 \text{ cm}$$

$$l_{w,a4} = 100 + 213,6 = 313,6 \text{ cm}$$

$$l_{w,a5} = 0 \text{ cm}$$

$$l_{w,a>6} = 66 \text{ cm}$$

$$V_{w,a<6} = V_{w,S_1} + V_{w,B-B} = 16 + 23,8 + 34,2 = 50,2 \text{ cm}^3$$

$$V_{w,a=6} = V_{w,A-A} = 16 + 23,8 + 34,2 = 23,8 \text{ cm}^3$$

6.2.) Volumen der Halbzeuge

Schnittlänge (gemessen):

HEA 160: 15,2 cm

HEA 240: 23 cm

Profillänge (gemessen): HEA 160: 27,7 cm;

HEA 240: 47,5 cm; HEA 360: 130 cm

Querschnittsfläche: $A_{HEA160} = 38,8 \text{ cm}^2$;

$A_{HEA240} = 76,8 \text{ cm}^2$; $A_{HEA360} = 143 \text{ cm}^2$

$$V_{HEA160} = l * A = 27,7 * 38,8 = 1075 \text{ cm}^3$$

$$V_{HEA240} = l * A = 47,5 * 76,8 = 3648 \text{ cm}^3$$

$$V_{HEA360} = l * A = 130 * 143 = 18590 \text{ cm}^3$$

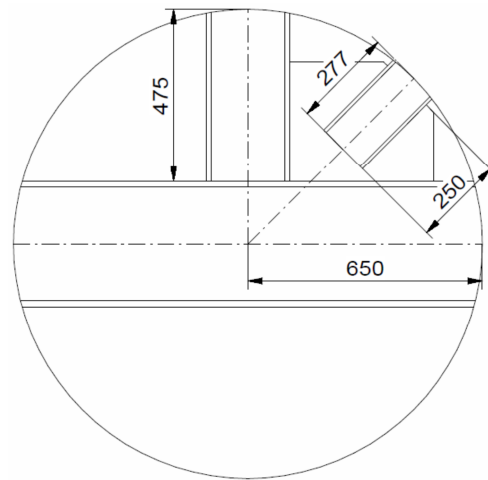


Abbildung 41: Profillängen zur Volumenberechnung

Abmessungen Blech:

$$\text{Länge der abgeschrägten Seite: } s = \sqrt{(400 - 260)^2 + (330 - 190)^2} = 19,8 \text{ cm}$$

$$U_{Bl} = 40 + 33 + 26 + 19 + 19,8 + 2 * 25 = 188 \text{ cm}$$

$$A_{Bl} = 40 * 33 - 0,5 * 14^2 - 15 * 25 = 847 \text{ cm}^2$$

3.6.1.5 Rechnungsbeispiel 5) Fachwerkknoten; Detail 2

$F_1 = 700 \text{ kN}$; $F_2 = 495 \text{ kN}$; $F_3 = 2800 \text{ kN}$; $F_4 = 2305 \text{ kN}$; Knotenblech aus S355

1.) Nachweis des Zugstabs S_1

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der reinen Zugbeanspruchung ist ein Nachweis der Querschnittsklasse nicht notwendig

1.2.) Nachweis der Zugkraft

HEA 160: $A = 38,8 \text{ cm}^2$ nach DIN EN 1025-3, Tab 1;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$F_{Ed} = 700 \text{ kN}$ (Zugkraft)

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{38,8 * 235}{1,0} = 911,8 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} / N_{t,Rd} = 700 \text{ kN} / 911,8 \text{ kN} = 0,77 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

1.3.) Nachweis der Kehlnaht

1.3.1.) Nahtabmessungen

HEA 160 nach DIN EN 1025-3, Tab 1

$$t_w = 6 \text{ mm}; t_f = 9 \text{ mm}; r = 15 \text{ mm}$$

Blech $t=12*280*620 \text{ mm}$

$$\min t = 9 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)}$$

$$\begin{aligned} a_w = 5 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{12} - 0,5 \\ &= 2,96 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 9 = 8,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

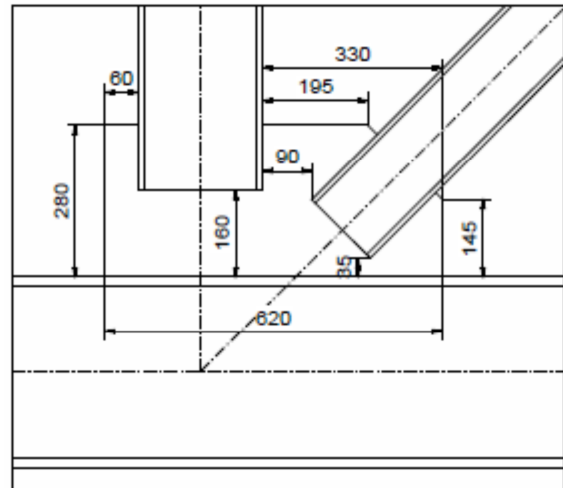


Abbildung 42: Abmessungen des Knotenblechs

$$l_w = 170 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

1.3.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$F_{\sigma \perp} = 0; F_{\tau \perp} = 0; F_{\tau \parallel} = F_{Ed} = 700 \text{ kN}$$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma \perp}^2 + F_{\tau \perp}^2 + F_{\tau \parallel}^2} = \frac{1}{4 * 17} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 700^2} = 10,29 \text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,5 * 20,7 = 10,35 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 10,29 \text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 10,35 * 1,0 = 10,35 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

1.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im Knotenblech

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

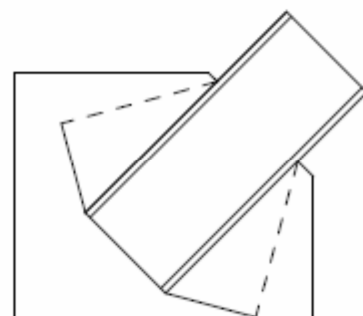
$$l_{riss} = 2 * l_w * \sin 30^\circ + s = 2 * 17 * \sin 30^\circ + 0 = 17 \text{ cm}$$

$$A = t * l_{riss} = 1,2 * 17 = 20,4 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{20,4 * 35,5}{1,00} = 724 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 700 \text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 724 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$



Risslinie unter 30° Lasteinleitung

1.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im HEA 160

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$A_{HEA\ 160} = 38,8\text{ cm}^2 \text{ nach DIN 1025-3, Tab.1; } s = t_{bl} = 1,2\text{ cm}$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * l_w * \sin 30^\circ + s + l_w * \sin 30^\circ)$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * 17 * \sin 30^\circ + 1,2 + 17 * \sin 30^\circ) = 36,4 + 17\text{ cm}$$

$$A = \min\{t * l_{riss} = 0,9 * 36,4 + 0,6 * 17 = 42,96\text{ cm}^2; A_{Rohr} = 38,8\text{ cm}^2\}$$

$$A = 38,8\text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{38,8 * 23,5}{1,00} = 911\text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 700\text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 911\text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.) Nachweis des Druckstabs S_2

2.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235\text{ N/mm}^2$, $f_u=360\text{ N/mm}^2$

$$F_{Ed} = 495\text{ kN (Druckkraft)}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

Gurt: einseitig gestützter Flansch nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

$$c = 0,5 * (240 - 2 * 21 - 7,5) = 95\text{ mm}; t = t_f = 12\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{95}{12} = 7,9 < 9\epsilon = 9 * 1,0 = 9 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

Steg: beidseitig gestützter Flansch nach DIN EN 1993-1-1, Tab 5.2

$$c = 230 - 2 * (17,5 + 21) = 153\text{ mm}; t = t_w = 10\text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{153}{10} = 15,3 < 72\epsilon = 72 * 1,0 = 72 \Rightarrow \text{Querschnittsklasse 1}$$

Gesamtquerschnittsklasse 1

2.2.) Nachweis der Druckkraft

$A = 76,8\text{ cm}^2$ nach DIN EN 1025-3, Tab 1;

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{76,8 * 23,5}{1,0} = 1805\text{ kN}$$

$$F_{Ed}/N_{c,Rd} = 495\text{ kN}/1805\text{ kN} = \underline{0,3 < 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.) Nachweis der Kehlnaht

2.3.1.) Nahtabmessungen

HEA 240 nach DIN EN 1025-3, Tab 1: $t_f = 12 \text{ mm}$

Blech $t=12*280*620 \text{ mm}$

$\min t = 12 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 5 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{12} - 0,5 = 2,96 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 12 = 8,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 120 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

2.3.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$F_{\sigma\perp} = 0$; $F_{\tau\perp} = 0$; $F_{\tau\parallel} = F_{Ed} = 495 \text{ kN}$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma\perp}^2 + F_{\tau\perp}^2 + F_{\tau\parallel}^2} = \frac{1}{4 * 12} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 495^2} = 6,9 \text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,5 * 20,7 = 10,35 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 10,31 \text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 10,35 * 1,0 = 10,35 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im Knotenblech

Linker Rand:

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$l_{riss} = l_w * \sin 30^\circ + s = 2 * 12 * \sin 30^\circ + 0 = 6 \text{ cm}$$

$$A_L = t * l_{riss} = 1,2 * 6 = 7,2 \text{ cm}^2$$

Lokale Querschnittsfläche des Blechs:

$$A_Q = 6 * 1,2 = 7,2 \text{ cm}^2$$

$$A = \min\{A_L = 7,2 \text{ cm}^2; A_Q = 7,2 \text{ cm}^2\} = 7,2 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7,2 * 35,5}{1,00} = 255 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 495/2 = 248 \text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 255 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Rechter Rand: Aufgrund größerer Abmessungen bei gleichen Einwirkungen gilt der Nachweis als erfüllt.

2.3.3.) Nachweis der Lasteinleitung im HEA 240

kritische Risslinie unter Lasteinleitungswinkel von 30° :

$$A_{HEA\ 240} = 76,8\text{ cm}^2 \text{ nach DIN 1025-3, Tab.1; } s = t_{bl} = 1,2\text{ cm}$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * l_w * \sin 30^\circ + s + l_w * \sin 30^\circ)$$

$$l_{riss} = 2 * (2 * 12 * \sin 30^\circ + 1,2 + 12 * \sin 30^\circ) = 26,4 + 12\text{ cm}$$

$$A = \min\{t * l_{riss} = 1,2 * 26,4 + 0,75 * 12 = 40,7\text{ cm}^2; A_{HEA\ 240} = 76,8\text{ cm}^2\}$$

$$A = 38,8\text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{59,6 * 23,5}{1,00} = 1400\text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$F_{Ed} = 495\text{ kN} \leq N_{pl,Rd} = 1400\text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.) Nachweis der Gurtstäbe $S_3; S_4$

3.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der reinen Zugbeanspruchung ist ein Nachweis der Querschnittsklasse nicht notwendig

3.2.) Nachweis der Zugkraft

HEA 360: $A = 143\text{ cm}^2$ nach DIN EN 1025-3, Tab 1;

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y = 235\text{ N/mm}^2$, $f_u = 360\text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$F_{3,Ed} = 2800\text{ kN}$ (Zugkraft); $F_{4,Ed} = 2270\text{ kN}$ (Zugkraft);

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{143 * 23,5}{1,0} = 3360\text{ kN}$$

$$F_{3,Ed}/N_{t,Rd} = 2800\text{ kN}/3360\text{ kN} = \underline{0,83} < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4. Nachweis im Schnitt C-C

4.1.) Berechnung der Querschnittswerte

Flächenschwerpunkt:

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $A = 143\text{ cm}^2$; $I_x = 33090\text{ cm}^4$

$$s_{C-C} = \frac{143 * 17,5 + 1,2 * 16 * (17,5 + 8)}{143 + 16 * 1,2} = 18,4\text{ cm}$$

$$e_{C-C} = s_{A-A} - 17,5 = 18,4 - 17,5 = 0,9\text{ cm}$$

$$I_{C-C} = 33090 + 0,9^2 * 143 + 1/12 * 16^3 * 1,2 + (17,5 + 8 - 18,4)^2 * 1,2 * 16 = 34582\text{ cm}^4$$

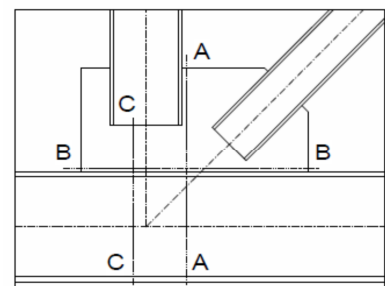


Abbildung 43: Lage der Schnitte A-A; B-B und C-C

wirksame Schubfläche:

$$\begin{aligned}A_{v,HEA\ 360} &= A - 2b * t_f + (t_w + 2r) * t_f \\&= 143 - 2 * 30 * 1,75 + (1 + 2 * 2,1) * 1,75 = 47,1\ cm^2 \\A_v &= A_{v,y,HEA\ 360} + A_{v,BI} = 47,1 + 1,2 * 16 = 66,3\ cm^2\end{aligned}$$

4.2.) Einwirkungen

$$\begin{aligned}N_{Ed} &= F_{S3} = 2800\ kN; V_{Ed} = 0,5F_{S2} = 0,5 * 495 = 248\ kN \\M_{Ed} &= N_{Ed} * e_{A-A} = 2800 * 0,9 = 2651\ kNcm\end{aligned}$$

4.3.) Nachweise

4.3.1.) Nachweis der Querkraft

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y=235\ N/mm^2$, $f_u=360\ N/mm^2$
 $\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{66,3 * 23,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 900\ kN$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 248/900 = 0,28 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.3.2.) Nachweis der Normalkraft

$V_{Ed}/V_{c,Rd} \leq 0,5 \rightarrow$ Abminderung von $N_{pl,Rd}$ nicht erforderlich

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(143 + 1,2 * 16) * 23,5}{1,0} = 3812\ kN$$

$$F_{N,HEA\ 360}/N_{pl,Rd} = 2800\ kN/3812\ kN = \underline{0,73 < 1,0} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.3.3.) Nachweis des Biegemoments

$$M_{pl,y,Rd} = 490,7\ kNm = 49070\ kNcm$$

Auf das Ansetzen des gesamten Querschnitts C – C wird an dieser Stelle verzichtet

$$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 0,74; a = (A - 2b * t_f)/A = (143 - 2 * 30 * 1,75)/143 = 0,26 \leq 0,5$$

$$M_{y,N,Rd} = \min \left\{ \begin{aligned} &M_{pl,y,Rd} * \frac{1-n}{1-0,5*a} = 49070 * \frac{1-0,73}{1-0,5*0,26} = 15228\ kNcm \\ &M_{pl,y,Rd} = 49070\ kNcm \end{aligned} \right.$$

$$M_{y,N,Rd} = 15228\ kNcm$$

$$M_{Ed}/M_{y,N,Rd} = 2651/15228 = 0,17 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.3.4.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \quad \text{mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}; f_y = 355\ N/mm^2$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,8$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{302}{10} = 30,2 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{0,8}{1,0} = 57,6$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

5. Nachweis im Schnitt A-A

5.1.) Berechnung der Querschnittswerte

Flächenschwerpunkt:

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $A = 143 \text{ cm}^2$; $I_x = 33090 \text{ cm}^4$

$$s_{C-C} = \frac{143 * 17,5 + 1,2 * 28 * (17,5 + 14)}{143 + 28 * 1,2} = 20,2 \text{ cm}$$

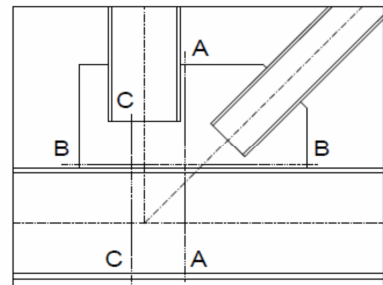
$$e_{C-C} = s_{A-A} - 17,5 = 20,2 - 17,5 = 2,7 \text{ cm}$$

$$I_{C-C} = 33090 + 2,7^2 * 143 + 1/12 * 28^3 * 1,2 + (17,5 + 14 - 20,2)^2 * 1,2 * 28 = 40617 \text{ cm}^4$$

wirksame Schubfläche:

$$A_{v,y,HEA 360} = 47,1 \text{ cm}^2$$

$$A_v = A_{v,y,HEA 360} + A_{v,BI} = 47,1 + 1,2 * 28 = 80,7 \text{ cm}^2$$



Lage der Schnitte A-A; B-B und C-C

5.2.) Einwirkungen

$$N_{Ed} = F_{S3} = 2800 \text{ kN}; V_{Ed} = F_{S2} = 495 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = N_{Ed} * e_{A-A} = 2800 * 2,7 = 7458 \text{ kNcm}$$

5.3.) Nachweise

5.3.1.) Nachweis der Querkraft

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{80,7 * 23,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 1095 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 495/1095 = 0,45 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

5.3.2.) Nachweis der Normalkraft

$V_{Ed}/V_{c,Rd} \leq 0,5 \rightarrow$ Abminderung von $N_{pl,Rd}$ nicht erforderlich

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(143 + 1,2 * 28) * 23,5}{1,0} = 4150 \text{ kN}$$

$$F_{N,HEA 360}/N_{pl,Rd} = 2800 \text{ kN}/4150 \text{ kN} = \underline{0,67} < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

5.3.3.) Nachweis des Biegemoments

$$M_{pl,y,Rd} = 490,7 \text{ kNm} = 49070 \text{ kNcm}$$

Auf das Ansetzen des gesamten Querschnitts A – A wird an dieser Stelle verzichtet

$$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 0,66; a = (A - 2b * t_f)/A = (143 - 2 * 30 * 1,75)/143 = 0,26 \leq 0,5$$

$$M_{y,N,Rd} = \min \left\{ \begin{aligned} M_{pl,y,Rd} * \frac{1-n}{1-0,5*a} &= 49070 * \frac{1-0,67}{1-0,5*0,26} = 18613 \text{ kNcm} \\ M_{pl,y,Rd} &= 49070 \text{ kNcm} \end{aligned} \right.$$

$$M_{y,N,Rd} = 18613 \text{ kNcm}$$

$$M_{Ed}/M_{y,N,Rd} = 7458/18613 = 0,40 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

5.3.4.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \quad \text{mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}; f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,8$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{302}{10} = 30,2 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{0,8}{1,0} = 57,6$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

5. Nachweis im Schnitt B-B

5.1.) Berechnung der Querschnittswerte der Naht

5.1.1.) Nahtabmessungen

HEA 360 nach DIN EN 1025-3, Tab 1; $t_f = 17,5 \text{ mm}$

Blech $t=12*280*620 \text{ mm}$

$\min t = 12 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 5 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{17,5} - 0,5 = 3,7 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 12 = 8,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 620 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

5.1.2.) Berechnung der Querschnittswerte

$$A_w = 62 * 2 * 0,5 = 62 \text{ cm}^2$$

$$I_{B-B} = 1/12 * 62^3 * 2 * 0,5 = 19860 \text{ cm}^4$$

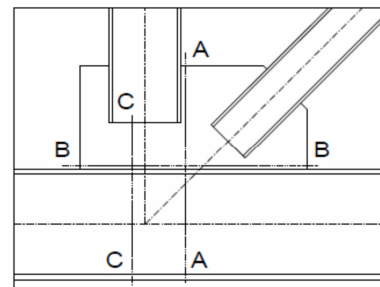
5.2.) Einwirkungen

Schnitt C-C: $A_{v,y,HEA 360} = 111,5 \text{ cm}^2$; $A_{v,BI} = 1,2 * 16 = 19,2 \text{ cm}^2$

$$N_{Ed} = \frac{F_{S2}}{2} * \frac{A_{v,y,HEA 360}}{A_{v,y,HEA 360} + A_{v,BI}} = \frac{495}{2} * \frac{47,1}{47,1 + 19,2} = 176 \text{ kN};$$

$$V_{Ed} = F_{S1} * \cos 45^\circ = 700 * \cos 45^\circ = 495 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = V_{Ed} * e_{HEA 360} = 495 * 35/2 = 8662 \text{ kNcm}$$



Lage der Schnitte A-A; B-B und C-C

5.3.) Nachweis der Naht

5.3.1.) Ermittlung der Spannungen

$$\alpha_1 = 45^\circ$$

$$\sigma_M = \frac{M_{Ed}}{I_{B-B}} * z_{max} = \frac{8662}{19860} * (62 * 0,5) = 13,5 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{0,5 * A_w} = \frac{175}{0,5 * 62} = 5,6$$

$$\sigma_{\perp} = (\sigma_N + \sigma_M) * \sin 45^\circ = (13,5 + 5,6) * \sin 45^\circ = 13,6 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\tau_{\perp} = (\sigma_N + \sigma_M) * \cos 45^\circ = (13,5 + 5,6) * \cos 45^\circ = 13,6 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\tau_{\parallel} = V_{Ed}/A_{w,\parallel} = 495/62 = 7,9 \frac{kN}{cm^2}$$

5.3.2.) Nachweis Naht mittels des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.2

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$$\sigma_{\perp} = 13,6 \frac{kN}{cm^2} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} * \beta_{lw} = 0,9 * \frac{36}{1,25} * 1,0 = 25,92 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\sigma_{Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{13,6^2 + 3 * (13,6^2 + 7,9^2)} = 30,5 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{\beta_{lw} * f_u}{\beta_l * \gamma_{M2}} = \frac{1,0 * 36}{0,8 * 1,25} = 36 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd} = 30,5/36,0 = 0,85 \leq 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

6.) Berechnung geometrischer Größen

6.1.) Nahtlänge und -volumen

Anschluss S_1

$$l_{w,S_1} = l_w * n = 4 * 17 = 68 \text{ cm}$$

$$V_{w,S_1} = \Sigma l_w * a_w^2 = 68 * 0,5^2 = 17 \text{ cm}^3$$

Anschluss S_2

$$l_{w,S_2} = l_w * n = 4 * 12 = 48 \text{ cm}$$

$$V_{w,S_2} = \Sigma l_w * a_w^2 = 48 * 0,4^2 = 7,7 \text{ cm}^3$$

Schnitt A-A

keine Naht vorhanden

Schnitt B-B

$$l_{w,B1} = 620 \text{ mm}; a_w = 5 \text{ mm}; n = 2$$

$$\Sigma l_{w,B-B} = l_w * n = 62 * 2 = 124 \text{ cm}$$

$$V_{w,B-B} = \Sigma l_w * a_w^2 = 124 * 0,5^2 = 25,5 \text{ cm}^3$$

Schnitt C-C

keine Naht vorhanden

$$l_{w,a3} = 0 \text{ cm}$$

$$l_{w,a4} = 48 \text{ cm}$$

$$l_{w,a5} = 68 + 124 = 192 \text{ cm}$$

$$l_{w,a6} = 0 \text{ cm}$$

$$V_w = V_{w,S_1} + V_{w,A-A} + V_{w,B-B} = 17 + 7,7 + 25,5 = 50,2 \text{ cm}^3$$

6.2.) Volumen der Halbzeuge

Schnittlänge (gemessen):

HEA 160: 15,2 cm

HEA 240: 23 cm

Profillänge (gemessen): HEA 160: 281 cm;

HEA 240: 31,5 cm; HEA 360: 130 cm

Querschnittsfläche: $A_{HEA160} = 38,8 \text{ cm}^2$;

$A_{HEA240} = 76,8 \text{ cm}^2$; $A_{HEA360} = 143 \text{ cm}^2$

$$V_{HEA160} = l * A = 28,1 * 38,8 = 1090 \text{ cm}^3$$

$$V_{HEA240} = l * A = 31,5 * 76,8 = 2419 \text{ cm}^3$$

$$V_{HEA360} = l * A = 130 * 143 = 18590 \text{ cm}^3$$

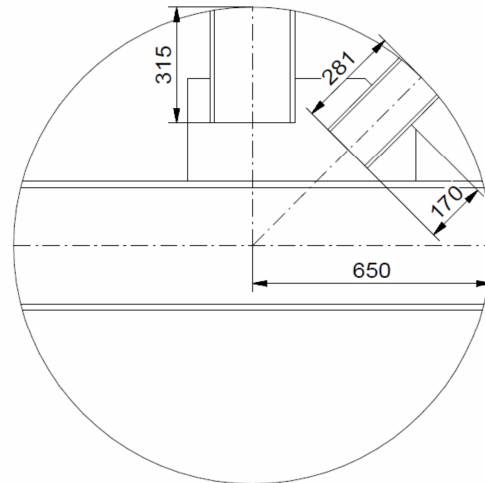


Abbildung 44: Profillängen zur Volumenberechnung

Abmessungen Blech:

$$\text{Länge der abgeschrägten Seite: } s = \sqrt{(33 - 19,5)^2 + (28 - 14,5)^2} = 19,1 \text{ cm}$$

$$U_{Bl} = 62 + 28 + 6 + 23 + 19,5 + 14,5 + 19,1 + 2 * (17 + 12) = 230,1 \text{ cm}$$

$$A_{Bl} = 62 * 28 - 0,5 * 13,5^2 - 15 * 17 - 23 * 12 = 1114 \text{ cm}^2$$

3.6.1.6 Rechnungsbeispiel 6) Querkraftanschluss; Detail 1; $V_{Ed}=150 \text{ kN}$

1.) Nachweis des I-Profils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der geringen Kräfte ($N = 0$; $M \approx 0$) am Anschluss kann an dieser Stelle auf ein Nachweis verzichtet werden.

1.2.) Nachweis der Querkraftbeanspruchung

IPE 270 nach DIN EN 1025-2, Tab 1; $h = 270 \text{ mm}$; $b = 135 \text{ mm}$; $t_w = 6,6 \text{ mm}$; $t_f = 10,2 \text{ mm}$;

$$r = 15 \text{ mm}; A = 45,9 \text{ cm}^2$$

$\gamma_{M0} = 1,0$ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)

S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

wirksame Schubfläche:

$$A_v = A - 2b * t_f + (t_w + 2r) * t_f = 45,9 - 2 * 13,5 * 1,02 + (0,66 + 2 * 1,5) * 1,02 = 22 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{22 * 23,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 299 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 150/299 = 0,4 \leq 1,0$$

1.3.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \quad \text{mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$h_w = h - 2 * (t_f + r) = 27 - 2 * (1 + 1,5) = 22 \text{ cm}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{22}{0,66} = 33,3 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,0} = 72$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

2.) Nachweis der Schraubenverbindung zwischen Winkel und IPE 270

2.1.) Abmessungen

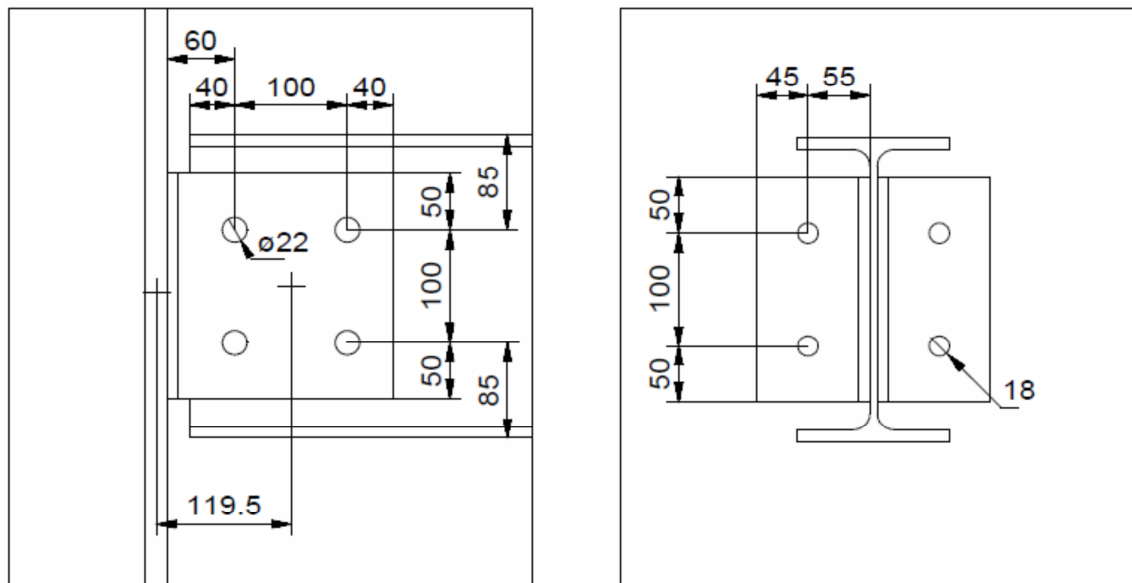


Abbildung 45: Abmessungen des Doppelwinkelanschlusses

Nennlochspiel: $\Delta d = 2\text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M20-4.6
L 200*100*10

	$t \hat{=}$ Dicke der dünnsten außen liegenden Blechs
$e_1 = 50\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80\text{ mm}$
$e_2 = 40\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 22 = 26,4\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80\text{ mm}$
$p_1 = 100\text{ mm}$	$\geq 2,2d_0 = 2,2 * 22 = 48,4\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 10 = 140\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$
$p_2 = 100\text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 22 = 52,8\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 10 = 140\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$

2.2.) Ermittlung der Schraubenkräfte

Anwendung des „ I_p “-Verfahrens

Schraubenanzahl $n=4$; $e=120\text{ mm}$

$$r_i^2 = (p_1/2)^2 + (p_2/2)^2 = (100/2)^2 + (100/2)^2 = 5000\text{ mm}^2$$

$$\Sigma r_i^2 = 4 * r_i^2 = 4 * 5000 = 20000\text{ mm}^2 \text{ (doppelsymmetrisches Schraubenbild)}$$

$$M_E = V_{Ed} * e = 150000 * 120 = 18 * 10^6\text{ Nmm}$$

Anteil aus Schubkraftbeanspruchung:

$$F_V = V_{Ed}/n = 150/4 = 37,5\text{ kN}$$

Anteile aus Momentenbeanspruchung:

$$F_{1,x} = M_E * \frac{\max z = (0,5 * p_1)}{\Sigma r_i^2} = 18 * 10^6 * \frac{0,5 * 100}{20000} = 45\text{ kN}$$

$$F_{1,z} = M_E * \frac{\max z = (0,5 * p_2)}{\Sigma r_i^2} = 18 * 10^6 * \frac{0,5 * 100}{2000} = 45\text{ kN}$$

Resultierende maximale Schraubenkraft:

$$F_R = \sqrt{F_{1,x}^2 + (F_{1,z} + F_V)^2} = \sqrt{45^2 + (45 + 37,5)^2} = 93,9\text{ kN}$$

2.3.) Nachweis auf Abscherung

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 20^2 = 314\text{ mm}^2$$

Kein Langer Anschluss: $L_j = 100\text{ mm} < 15 * d = 15 * 20 = 300\text{ mm}$

$f_{ub} = 600\text{ N/mm}^2$ nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; $\gamma_{M2} = 1,25$ nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 314}{1,25} = 90432\text{ N} = 90,4\text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 2$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 90,4 * 2 = 180,8\text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 93,9 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 180 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.4.) Nachweis auf Lochleibung

Winkel 200*100*10

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{50}{3 * 22} = 0,75; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{100}{3 * 22} - \frac{1}{4} = 1,26; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 0,75; \alpha_{d,2} = 1,26; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,75$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{40}{22} - 1,7 = 3,3 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{100}{22} - 1,7 = 4,6 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = 2 * \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 2 * \frac{2,5 * 0,75 * 36 * 2,0 * 1,0}{1,25} = 216 \text{ kN}$$

IPE 270:

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{85}{3 * 22} = 1,28; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{100}{3 * 22} - \frac{1}{4} = 1,26; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 1,28; \alpha_{d,2} = 1,26; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 1,0$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{40}{22} - 1,7 = 3,3 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{100}{22} - 1,7 = 4,6 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

Einschnittiger Anschluss mit einem Schraubenpaar:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 36 * 2,0 * 0,66}{1,25} = 95 \text{ kN}$$

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 92 \text{ kN} \leq \min F_{b,Rd} = 95 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.5.) Nachweis der Lasteinleitung

Ein weiterer Nachweis der Lasteinleitung ist nicht erforderlich.

3.) Nachweis der Schraubenverbindung zwischen Winkel und HEB 1000

3.1.) Abmessungen

HEB 1000 nach DIN EN 1025-2, Tab 1; $t_W = 19 \text{ mm}$;

Nennlochspiel: $\Delta d = 2 \text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M16-4.6

	$t \hat{=}$ Dicke der dünnsten außen liegenden Blechs
$e_1 = 50 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$ $\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$e_2 = 45 \text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$ $\leq 4t + 40 \text{ mm} = 4 * 10 + 40 = 80 \text{ mm}$
$p_1 = 100 \text{ mm}$	$\geq 2,2d_0 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 10 = 140 \text{ mm}$ $\leq 200 \text{ mm}$

3.2.) Ermittlung der Schraubenkräfte

$$M \approx 0$$

$$F_V = V_{Ed}/n = 150/4 = 37,5 \text{ kN}$$

3.3.) Nachweis auf Abscherung

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 16^2 = 201 \text{ mm}^2$$

Kein Langer Anschluss: $L_j = 100 \text{ mm} < 15 * d = 15 * 16 = 240 \text{ mm}$

$f_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2$ nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; $\gamma_{M2} = 1,25$ nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 201}{1,25} = 57888 \text{ N} = 57,8 \text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 57,8 * 1 = 57,8 \text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 37,5 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 57,8 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.4.) Nachweis auf Lochleibung

Winkel 200*100*10

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{50}{3 * 18} = 0,92; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{100}{3 * 18} - \frac{1}{4} = 1,6; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 0,75; \alpha_{d,2} = 1,26; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,92$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{45}{18} - 1,7 = 5,3 \right. \\ \left. 2,5 \right.$$

$$k_1 = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,92 * 36 * 1,6 * 1,0}{1,25} = 105 \text{ kN} \\ 1,5 * \frac{f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 1,5 * \frac{36 * 1,6 * 1,0}{1,25} = 69,1 \text{ kN} \end{array} \right.$$

HEA 1000:

Aufgrund der höheren Abmessungen wird an dieser Stelle auf einem Nachweis verzichtet.

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 37,5 \text{ kN} \leq \min F_{b,Rd} = 69,1 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.5.) Nachweis der Lasteinleitung

Ein weiterer Nachweis der Lasteinleitung ist nicht erforderlich.

4.) Berechnung geometrischer Größen

4.1.) Nahtlänge und -volumen

Keine Schweißnähte vorhanden

4.2.) Volumen der Halbzeuge

$$A_{IPE270} = 45,9 \text{ cm}^2; A_{L200*100*10} = 29,2 \text{ cm}^2$$

$$\text{Bezugslänge IPE 270 (Anschlussradius 30cm): } l_{IPE270} = 30 - 0,5 * 1,9 - 2,0 = 27,05 \text{ cm}$$

$$\text{Länge Winkel: } l_{L200*100*10} = 20 \text{ cm}$$

$$V_{IPE270} = l_{IPE270} * A_{IPE270} = 27,05 * 45,9 = 1242 \text{ cm}^3$$

$$V_L = l_{L200*100*10} * A_{L200*100*10} = 20 * 29,2 = 584 \text{ cm}^3$$

3.6.1.7 Rechnungsbeispiel 7) Querkraftanschluss; Detail 2; $V_{Ed}=150 \text{ kN}$

1.) Nachweis des I-Profils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der geringen Kräfte ($N = 0; M \approx 0$) am Anschluss kann an dieser Stelle auf ein Nachweis verzichtet werden.

1.2.) Nachweis der Querkraftbeanspruchung

$$\text{IPE 270 nach DIN EN 1025-2, Tab 1; } h = 270 \text{ mm; } b = 135 \text{ mm; } t_w = 6,6 \text{ mm; } t_f = 10,2 \text{ mm;} \\ r = 15 \text{ mm; } A = 45,9 \text{ cm}^2$$

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)}$$

$$\text{S235 nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: } f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

wirksame Schubfläche:

$$A_v = A - 2b * t_f + (t_w + 2r) * t_f = 45,9 - 2 * 13,5 * 1,02 + (0,66 + 2 * 1,5) * 1,02 = 22 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{22 * 23,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 299 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 150/299 = 0,4 \leq 1,0$$

1.3.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \quad \text{mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$h_w = h - 2 * (t_f + r) = 27 - 2 * (1 + 1,5) = 22 \text{ cm}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{22}{0,66} = 33,3 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,0} = 72$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

2.) Nachweis der Schraubenverbindung zwischen Fahnenblech und IPE 270

2.1.) Abmessungen

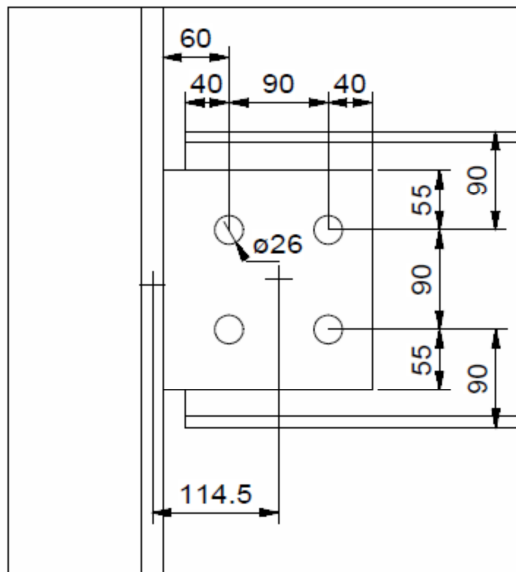


Abbildung 46: Abmessungen des Fahnenblechanschlusses

Nennlochspiel: $\Delta d = 2\text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M24-4.6
 Bl 10*190*200

	$t \hat{=}$ Dicke der dünnsten außen liegenden Blechs
$e_1 = 55\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 26 = 31,2\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 6,6 + 40 = 66\text{ mm}$
$e_2 = 40\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 26 = 31,2\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 6,6 + 40 = 66\text{ mm}$
$p_1 = 90\text{ mm}$	$\geq 2,2d_0 = 2,2 * 26 = 57,2\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 6,6 = 92,4\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$
$p_2 = 90\text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 22 = 62,4\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 6,6 = 92,4\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$

2.2.) Ermittlung der Schraubenkräfte

Anwendung des „ I_p “-Verfahrens

Schraubenanzahl $n=4$; $e=115\text{ mm}$

$$r_i^2 = (p_1/2)^2 + (p_2/2)^2 = (90/2)^2 + (90/2)^2 = 4050\text{ mm}^2$$

$$\Sigma r_i^2 = 4 * r_i^2 = 4 * 4050 = 16200\text{ mm}^2 \text{ (doppelsymmetrisches Schraubenbild)}$$

$$M_E = V_{Ed} * e = 150000 * 115 = 17,3 * 10^6\text{ Nmm}$$

Anteil aus Schubkraftbeanspruchung:

$$F_V = V_{Ed}/n = 150/4 = 37,5\text{ kN}$$

Anteile aus Momentenbeanspruchung:

$$F_{1,x} = M_E * \frac{\max z = (0,5 * p_1)}{\Sigma r_i^2} = 17,3 * 10^6 * \frac{0,5 * 90}{16200} = 47,9\text{ kN}$$

$$F_{1,z} = M_E * \frac{\max z = (0,5 * p_2)}{\Sigma r_i^2} = 17,3 * 10^6 * \frac{0,5 * 90}{16200} = 47,9\text{ kN}$$

Resultierende maximale Schraubenkraft:

$$F_R = \sqrt{F_{1,x}^2 + (F_{1,z} + F_V)^2} = \sqrt{47,9^2 + (47,9 + 37,5)^2} = 98\text{ kN}$$

2.3.) Nachweis auf Abscherung

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 24^2 = 452\text{ mm}^2$$

Kein Langer Anschluss: $L_j = 90\text{ mm} < 15 * d = 15 * 24 = 360\text{ mm}$

$f_{ub} = 600\text{ N/mm}^2$ nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; $\gamma_{M2} = 1,25$ nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 452}{1,25} = 90432\text{ N} = 130\text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 130 * 1 = 130\text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 98 \text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 130 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.4.) Nachweis auf Lochleibung

Bl 10*190*200

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{55}{3 * 26} = 0,7; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{90}{3 * 26} - \frac{1}{4} = 0,9; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 0,7; \alpha_{d,2} = 0,9; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,7$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{40}{26} - 1,7 = 2,6 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{90}{26} - 1,7 = 3,1 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,7 * 36 * 2,4 * 1,0}{1,25} = 117 \text{ kN}$$

IPE 270:

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{90}{3 * 26} = 1,1; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{90}{3 * 22} - \frac{1}{4} = 0,9; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 1,1; \alpha_{d,2} = 0,9; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,9$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{40}{26} - 1,7 = 2,6 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{90}{26} - 1,7 = 3,1 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,9 * 36 * 2,4 * 0,66}{1,25} = 102 \text{ kN}$$

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 98 \text{ kN} \leq \min F_{b,Rd} = 102 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.5.) Nachweis der Lasteinleitung

Ein weiterer Nachweis der Lasteinleitung ist nicht erforderlich.

3.) Nachweis der Kehlnaht

3.1.) Nahtabmessungen

HEA 400 nach DIN EN 1025-3, Tab 1: $t_f = 19 \text{ mm}$

Blech $t = 10 * 190 * 200 \text{ mm}$

$\min t = 10 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 4 \text{ mm} &\geq 3 \text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{19} - 0,5 = 3,85 \text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 10 = 7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 200 \text{ mm} \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24 \text{ mm} \end{cases}$$

3.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$F_{\sigma\perp} = 0$; $F_{\tau\perp} = 0$; $F_{\tau\parallel} = V_{Ed} = 150 \text{ kN}$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma\perp}^2 + F_{\tau\perp}^2 + F_{\tau\parallel}^2} = \frac{1}{2 * 20} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 150^2} = 3,75 \text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,4 * 20,7 = 8,28 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 3,75 \text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 8,28 * 1,0 = 8,28 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.) Berechnung geometrischer Größen

4.1.) Nahtlänge und -volumen

$$l_w = 2 * 200 = 400 \text{ mm}; a_w = 4 \text{ mm}$$

$$V_w = l_w * a_w^2 = 2 * 20 * 0,4^2 = 6,4 \text{ cm}^3$$

4.2.) Volumen der Halbzeuge

$$A_{IPE270} = 45,9 \text{ cm}^2$$

$$\text{Bezugslänge IPE 270 (Anschlussradius 30cm): } l_{IPE270} = 30 - 0,5 * 1,9 - 2,0 = 27,05 \text{ cm}$$

$$V_{IPE270} = l_{IPE270} * A_{IPE270} = 27,05 * 45,9 = 1242 \text{ cm}^3$$

$$B110*190*200; d_0 = 2,6 \text{ cm}$$

$$U_{bl} = 2 * (19 + 20) = 78 \text{ cm}$$

$$U_{loch} = d_0 * \pi = 2,6 * \pi = 8,2 \text{ cm}$$

$$A_{bl} = 19 * 20 = 380 \text{ cm}^2$$

3.6.1.8 Rechnungsbeispiel 8) Querkraftanschluss; Detail 3; $V_{Ed}=150 \text{ kN}$

1.) Nachweis des I-Profils

1.1.) Bestimmung der Querschnittsklasse

Aufgrund der geringen Kräfte ($N = 0$; $M \approx 0$) am Anschluss kann an dieser Stelle auf ein Nachweis verzichtet werden.

1.2.) Nachweis der Querkraftbeanspruchung

IPE 270 nach DIN EN 1025-2, Tab 1; $h = 270 \text{ mm}$; $b = 135 \text{ mm}$; $t_w = 6,6 \text{ mm}$; $t_f = 10,2 \text{ mm}$;

$$r = 15 \text{ mm}; A = 45,9 \text{ cm}^2$$

$$\gamma_{M0} = 1,0 \text{ nach DIN EN 1993-1-1 6.1(1)}$$

$$S235 \text{ nach DIN EN 1993-1-1, Tab 3.1: } f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

wirksame Schubfläche:

$$A_v = A - 2b * t_f + (t_w + 2r) * t_f = 45,9 - 2 * 13,5 * 1,02 + (0,66 + 2 * 1,5) * 1,02 = 22 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{22 * 23,5}{\sqrt{3} * 1,0} = 299 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 150/299 = 0,4 \leq 1,0$$

1.3.) Nachweis des gegen Schubbeulen des unausgesteiften Stegblechs

Nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.6 (6) kann auf ein Nachweis gegen Schubbeulen verzichtet werden wenn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta}; \text{ mit } \eta = 1,0 \text{ (Näherung)}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$h_w = h - 2 * (t_f + r) = 27 - 2 * (1 + 1,5) = 22 \text{ cm}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{22}{0,66} = 33,3 \leq 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,0} = 72$$

Ein Nachweis ist nicht erforderlich.

2.) Nachweis der Kehlnaht

2.1.) Nahtabmessungen

Blech $t=8*140*160$ mm

$\min t = 8\text{ mm} \leq 4\text{ mm}$ nach DIN EN 1993-1-8, 4.1(1)

$$\begin{aligned} a_w = 4\text{ mm} &\geq 3\text{ mm} \\ &\geq \sqrt{t_{\max}} - 0,5 = \sqrt{19} - 0,5 = 3,85\text{ mm} \\ &\leq 0,7 * t_{\min} = 0,7 * 8 = 5,6\text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_w = 150\text{ mm} \geq \begin{cases} 30\text{ mm} \\ 6 * a_w = 6 * 4 = 24\text{ mm} \end{cases}$$

2.2.) Nachweis der Naht mittels des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, 4.5.3.3

$\gamma_{M2} = 1,25$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 2.1; $\beta_w = 0,8$ nach DIN EN 1993-1-8, Tab 4.1;

Kein Überlappstoß: $\beta_{lw} = 1,0$;

$F_{\sigma\perp} = 0$; $F_{\tau\perp} = 0$; $F_{\tau\parallel} = V_{Ed} = 150\text{ kN}$

Bemessungswert der einwirkenden Kräfte je Längeneinheit

$$F_{w,Ed} = \frac{1}{\Sigma l_w} * \sqrt{F_{\sigma\perp}^2 + F_{\tau\perp}^2 + F_{\tau\parallel}^2} = \frac{1}{2 * 15} * \sqrt{0^2 + 0^2 + 150^2} = 5,0\text{ kN/cm}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit je Längeneinheit

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 20,7\text{ kN/cm}^2$$

$$F_{w,Rd} = a_w * f_{vw,d} = 0,4 * 20,7 = 8,28\text{ kN/cm}^2$$

Nachweis

$$F_{w,Ed} = 5,0\text{ kN/cm}^2 < F_{w,Rd} * \beta_{lw} = 8,28 * 1,0 = 8,28\text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.) Nachweis der Schraubenverbindung zwischen Stirnplatte und HEB 1000

3.1.) Abmessungen

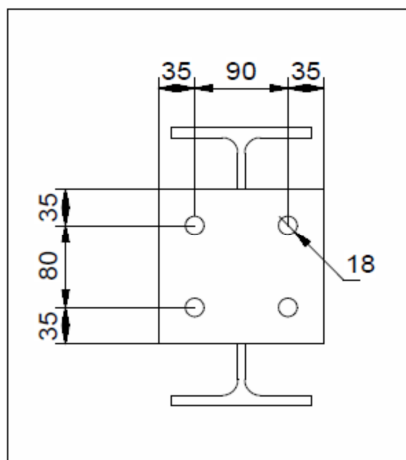


Abbildung 47: Abmessungen des Stirnplattenanschlusses

Nennlochspiel: $\Delta d = 2\text{ mm}$; Stahlsorte: S235 nach DIN EN 10025-2; M16-4.6
 Bl 8*150*160

	$t \hat{=}$ Dicke der dünnsten außen liegenden Blechs
$e_1 = 35\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 8 + 40 = 72\text{ mm}$
$e_2 = 35\text{ mm}$	$\geq 1,2d_0 = 1,2 * 18 = 21,6\text{ mm}$ $\leq 4t + 40\text{ mm} = 4 * 8 + 40 = 72\text{ mm}$
$p_1 = 70\text{ mm}$	$\geq 2,2d_0 = 2,2 * 18 = 39,6\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 8 = 112\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$
$p_2 = 90\text{ mm}$	$\geq 2,4d_0 = 2,4 * 18 = 43,2\text{ mm}$ $\leq 14t = 14 * 8 = 112\text{ mm}$ $\leq 200\text{ mm}$

3.2.) Ermittlung der Schraubenkräfte

$$F_V = V_{Ed}/n = 150/4 = 37,5\text{ kN}$$

3.3.) Nachweis auf Abscherung

Schaft in der Scherfuge: $\alpha_v = 0,6$

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{\pi}{4} * 16^2 = 201\text{ mm}^2$$

Kein Langer Anschluss: $L_j = 60\text{ mm} < 15 * d = 15 * 16 = 240\text{ mm}$

$f_{ub} = 600\text{ N/mm}^2$ nach EN 1993-1-8, Tab 3.1; $\gamma_{M2} = 1,25$ nach EN 1993-1-8, Tab 2.1

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 600 * 201}{1,25} = 57888\text{ N} = 57,8\text{ kN}$$

Anzahl der Scherflächen $n_c = 1$

$$\Sigma F_{v,Rd} = F_{v,Rd} * n_c = 57,8 * 1 = 57,8\text{ kN}$$

Nachweis auf Abscherung

$$F_{v,Ed} = 37,5\text{ kN} \leq \Sigma F_{v,Rd} = 57,8\text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.4.) Nachweis auf Lochleibung

Bl 8*140*150

$$\alpha_{d,1} = \frac{e_1}{3 * d_0} = \frac{35}{3 * 18} = 0,64; \alpha_{d,2} = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 * 18} - \frac{1}{4} = 1,04; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,66$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_{d,1} = 0,64; \alpha_{d,2} = 1,04; \frac{f_{ub}}{f_u} = 1,66; 1,0 \right] \rightarrow \alpha_b = 0,64$$

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 * \frac{e_2}{d_o} - 1,7 = 2,8 * \frac{35}{18} - 1,7 = 3,74 \\ 1,4 * \frac{p_2}{d_o} - 1,7 = 1,4 * \frac{90}{18} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{cases}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,64 * 36 * 1,6 * 0,8}{1,25} = 59 \text{ kN}$$

HEB 1000:

Aufgrund der höheren Abmessungen wird an dieser Stelle auf einem Nachweis verzichtet.

Nachweis auf Lochleibung

$$F_{v,Ed} = 37,5 \text{ kN} \leq \min F_{b,Rd} = 59 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.5.) Nachweis der Lasteinleitung

$$e = 0,5 * p_2 = 0,5 * 90 = 45 \text{ mm}; \text{ Lastwinkel } \alpha = 45^\circ$$

$$l_{riss} = \min\{4e * \tan \alpha = 4 * 45 * \tan 45^\circ = 180 \text{ mm}; h_{blech} = 140 \text{ mm}\}$$

$$A_{nv} = l_{riss} * t = 140 * 8 = 1120 = 11,2 \text{ cm}^2$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = 0 + \frac{23,5 * 11,2}{\sqrt{3} * 1,0} = 151,9 \text{ kN}$$

Nachweis der Lasteinleitung

$$0,5 * V_{Ed} = 0,5 * 150 = 75 \text{ kN} \leq V_{eff,Rd} = 151,9 \text{ kN}$$

4.) Berechnung geometrischer Größen

4.1.) Nahtlänge und -volumen

$$l_w = 2 * 150 = 300 \text{ mm}; a_w = 4 \text{ mm}$$

$$V_w = l_w * a_w^2 = 30 * 0,4^2 = 4,8 \text{ cm}^3$$

4.2.) Volumen der Halbzeuge

$$A_{IPE270} = 45,9 \text{ cm}^2$$

$$\text{Bezugslänge IPE 270 (Anschlussradius 30cm): } l_{IPE270} = 30 - 0,5 * 1,9 - 0,8 = 28,25 \text{ cm}$$

$$V_{IPE270} = l_{IPE270} * A_{IPE270} = 28,25 * 45,9 = 1297 \text{ cm}^3$$

$$\text{Bl8*150*160; } d_0 = 1,8 \text{ cm}$$

$$U_{bl} = 2 * (15 + 16) = 62 \text{ cm}$$

$$U_{loch} = d_0 * \pi = 1,8 * \pi = 5,6 \text{ cm}$$

$$A_{bl} = 15 * 16 = 240 \text{ cm}^2$$

3.6.2 Ermittlung der Fertigungskosten

3.6.2.1 Rechnungsbeispiel 9) Druckrohr; Detail 1; $F_{Ed}=180\text{ N}$

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 1 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{Pr,T100} = 250,8\text{ cm}^3; V_{Pr,Rohr} = 90,9\text{ cm}^3; V_{Naht} = 2,51\text{ cm}^3; n_{schr} = 2$$

$$k_{Mat,Pr} = 0,65\text{ €/kg}; k_{Mat,Naht} = 1,37\text{ €/kg}; f_{AN} = 1,22; k_{Stk} = 1,17\text{ €/kg}$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \rho) * k_{Mat,Pr} = (250,8 + 90,9) * 0,00785 * 0,65 = 1,74\text{ €}$$

$$c_{BI} = 0\text{ €}$$

$$c_{Naht} = V_{Naht} * f_{AN} * \rho * k_{Mat,Naht} = 2,51 * 1,22 * 0,00785 * 1,37 = 0,03\text{ €}$$

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk}) = 2 * 1,17 = 2,34\text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit der Bandsäge und der Stanze bearbeitet

$$l = 30; n_L = 2; k_{Betr,BS} = 30\text{ €/Std}; t_{Tr} = 10\text{ min}; t_{nsä} = 1\text{ min}; t_{nbo} = 0,1\text{ min}; t_w = 4\text{ min}; t_{hbo} = 0,1\text{ min}; s_{schn,T100} = 10\text{ cm}; s_{schn,Rohr} = 8,89\text{ cm}; v_{schn} = 3,6\text{ cm/min}$$

$$c_{BS} = \left(2 * \frac{t_{Tr}}{l} + 2 * t_{nsä} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} + t_w + n_L * (t_{hbo} + t_{nbo}) \right) * \frac{1\text{Std}}{60\text{min}} * k_{Betr,BS}$$

$$c_{BS} = \left(2 * \frac{10}{30} + 2 * 1 + \frac{10 + 8,89}{3,6} + 4 + 2 * (0,1 + 0,1) \right) * \frac{1}{60} * 30 = 6,11\text{ €}$$

$$c_{Pl} = 0\text{ €}$$

$$l = 30; n_{ht} = 1; k_{Betr,ZB} = 30\text{ €/Std}; t_{Tr} = 4\text{ min}; t_{nzb} = 1,2\text{ min}; t_{hzb} = 1\text{ min}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) \right) * \frac{1\text{Std}}{60\text{min}} * k_{Betr,Zb}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{4}{30} + 1 * (1,2 + 1) \right) * \frac{1}{60} * 30 = 1,17\text{ €}$$

$f_{nz} = 1,2$; $k_{Betr.} = 30 \text{ €/Std}$; $t_{Tr} = 10 \text{ min}$; $l = 30$; $t_{nschw} = 1 \text{ min}$; $s_{Naht} = 27,9 \text{ cm}$;
 $v_{schw} = 34 \text{ cm/min}$

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) \right) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * k_{Betr, schw}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{10}{60} + 1 + \frac{27,9 * 1,2}{34} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 1,16 \text{ €}$$

$n_{schr} = 2$; $t_{ar} = 10 \text{ min}$; $t_{ef} = 1 \text{ min}$; $k_{Betr.} = 40 \text{ €/Std}$

$$c_{schr} = \left(t_{ar} + \Sigma(n_{schr} * t_{ef}) \right) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * k_{Betr, schr}$$

$$c_{schr} = (10 + 2 * 1) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * 40 = 8,00 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 1,74 + 0 + 0,03 + 2,34 + 6,11 + 0 + 1,17 + 1,16 + 8,00 = \underline{20,55 \text{ €}}$$

3.6.2.2 Rechnungsbeispiel 10) Druckrohr; Detail 2; $F_{Ed}=180 \text{ N}$; Blech aus S355

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 2 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{Pr} = 112,3 \text{ cm}^3; A_{Bl} = 168 \text{ cm}^2; t_{Bl} = 1 \text{ cm}; V_{Naht} = 2,52 \text{ cm}^3; n_{schr} = 2$$

$$k_{Mat, Pr} = 0,65 \text{ €/kg}; k_{Mat, Naht} = 1,37 \text{ €/kg}; k_{Mat, Bl} = 0,85 \text{ €/kg}; f_{AN} = 1,22;$$

$$k_{Stk} = 1,31 \text{ €/kg}; f_{vs} = 1,2$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \rho) * k_{Mat, Pr} = 112,3 * 0,00785 * 0,65 = 0,57 \text{ €}$$

$$c_{Bl} = A_{Bl} * t_{Bl} * f_{vs} * \rho * k_{Mat, Bl} = 168 * 1 * 1,2 * 0,00785 * 0,85 = 1,35 \text{ €}$$

$$c_{Naht} = V_{Naht} * f_{AN} * \rho * k_{Mat, Naht} = 2,52 * 1,22 * 0,00785 * 1,37 = 0,03 \text{ €}$$

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk}) = 2 * 1,31 = 2,62 \text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit der Bandsäge und der Stanze bearbeitet

$$l = 30; n_L = 2; k_{Betr, BS} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; t_{nsä} = 1 \text{ min}; s_{schn} = 8,89 \text{ cm};$$

$$v_{schn} = 3,6 \text{ cm/min}$$

$$c_{BS} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nsä} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,BS}$$

$$c_{BS} = \left(\frac{10}{30} + 1 + \frac{8,89}{3,6} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 2,15 \text{ €}$$

$$A_{BT} = 45000 \text{ cm}^2 (1,5 * 3 \text{ m}); f_{vs} = 1,2; A_{Bl} = 168 \text{ cm}^2$$

$$l_{BT} = \frac{A_{BT} * 0,9}{A_{Bl} * f_{vs}} = \frac{45000 * 0,9}{168 * 1,2} = 201$$

$$n_{Lö} = 2; k_{Betr,pl} = 60 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 25 \text{ min}; t_{npl} = 1 \text{ min}; t_{upl} = 0,8 \text{ min}; U_{lö} = 5,6 \text{ cm};$$

$$s_{schn} = 75 \text{ cm}; v_{schn} = 104 \text{ cm/min}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{t_{Tr}}{l_{BT}} + t_{npl} + t_{upl} * n_{lö} + \frac{s_{schn} + n_{lö} * U_{lö}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,pl}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{25}{201} + 1 + 0,8 * 2 + \frac{75 + 2 * 5,6}{104} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 3,55 \text{ €}$$

$$l = 30; n_{ht} = 1; k_{Betr,ZB} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 4 \text{ min}; t_{nzb} = 1,2 \text{ min}; t_{hzb} = 1 \text{ min}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Zb}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{4}{30} + 1 * (1,2 + 1) \right) * \frac{1}{60} * 30 = 1,17 \text{ €}$$

$$f_{nz} = 1,2; k_{Betr.} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; l = 30; t_{nschw} = 1 \text{ min}; s_{Naht} = 28,0 \text{ cm};$$

$$v_{schw} = 34 \text{ cm/min}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schw}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{10}{60} + 1 + \frac{28 * 1,2}{34} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 1,16 \text{ €}$$

$$n_{schr} = 2; t_{ar} = 10 \text{ min}; t_{ef} = 2 \text{ min}; k_{Betr.} = 40 \text{ €/Std}$$

$$c_{schr} = \left(t_{ar} + \Sigma(n_{schr} * t_{ef}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schr}$$

$$c_{schr} = (10 + 2 * 2) * \frac{1Std}{60min} * 40 = 9,33 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 0,57 + 1,34 + 0,03 + 2,62 + 2,15 + 3,55 + 1,17 + 1,16 + 9,33 = \underline{21,93 \text{ €}}$$

3.6.2.3 Rechnungsbeispiel 11) Druckrohr; Detail 3; $F_{Ed}=140 \text{ N}$; Blech aus S235

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 3 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{Pr} = 123 \text{ cm}^3; A_{Bl} = 168 \text{ cm}^2; t_{Bl} = 1 \text{ cm}; V_{Naht} = 2,7 \text{ cm}^3; n_{schr} = 2$$

$$k_{Mat,Pr} = 0,65 \text{ €/kg}; k_{Mat,Naht} = 1,37 \text{ €/kg}; k_{Mat,Bl} = 0,65 \text{ €/kg}; f_{AN} = 1,22;$$

$$k_{Stk} = 1,17 \text{ €/kg}; f_{vs} = 1,05$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \varrho) * k_{Mat,Pr} = 123 * 0,00785 * 0,65 = 0,62 \text{ €}$$

$$c_{Bl} = A_{Bl} * t_{Bl} * f_{vs} * \varrho * k_{Mat,Bl} = 168 * 1 * 1,05 * 0,00785 * 0,65 = 0,90 \text{ €}$$

$$c_{Naht} = V_{Naht} * f_{AN} * \varrho * k_{Mat,Naht} = 2,7 * 1,22 * 0,00785 * 1,37 = 0,04 \text{ €}$$

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk}) = 2 * 1,17 = 2,34 \text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit der Bandsäge und der Stanze bearbeitet

$$l = 30; n_L = 2; k_{Betr,BS} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; t_{nsä} = 1 \text{ min}; s_{schn} = 8,89 \text{ cm}; \\ v_{schn} = 3,6 \text{ cm/min}$$

$$c_{BS} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nsä} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} \right) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * k_{Betr,BS}$$

$$c_{BS} = \left(\frac{10}{30} + 1 + \frac{8,89}{3,6} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 2,15 \text{ €}$$

$$A_{BT} = 45000 \text{ cm}^2 (1,5 * 3 \text{ m}); f_{vs} = 1,05; A_{Bl} = 168 \text{ cm}^2$$

$$l_{BT} = \frac{A_{BT} * 0,9}{A_{Bl} * f_{vs}} = \frac{45000 * 0,9}{168 * 1,05} = 230$$

$n_{L\ddot{o}} = 2; k_{Betr,pl} = 60 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 25 \text{ min}; t_{npl} = 1 \text{ min}; t_{upl} = 0,8 \text{ min}; U_{l\ddot{o}} = 6,9 \text{ cm};$
 $s_{schn} = 75 \text{ cm}; v_{schn} = 104 \text{ cm/min}$

$$c_{Pl} = \left(\frac{t_{Tr}}{l_{BT}} + t_{npl} + t_{upl} * n_{l\ddot{o}} + \frac{s_{schn} + n_{l\ddot{o}} * U_{l\ddot{o}}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,pl}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{25}{230} + 1 + 0,8 * 2 + \frac{75 + 2 * 6,9}{104} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 3,34 \text{ €}$$

$l = 30; n_{ht} = 1; k_{Betr,ZB} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 4 \text{ min}; t_{nzb} = 1,2 \text{ min}; t_{hzb} = 1 \text{ min}$
 $t_{schl} = 10 \text{ min}$

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) + t_{schl} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Zb}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{4}{30} + 1 * (1,2 + 1) + 10 \right) * \frac{1}{60} * 30 = 6,17 \text{ €}$$

$f_{nz} = 1,2; k_{Betr.} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; l = 30; t_{nschw} = 1 \text{ min}; s_{Naht} = 30,0 \text{ cm};$
 $v_{schw} = 34 \text{ cm/min}$

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schw}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{10}{30} + 1 + \frac{30 * 1,2}{34} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 1,20 \text{ €}$$

$n_{schr} = 2; t_{ar} = 10 \text{ min}; t_{ef} = 1 \text{ min}; k_{Betr.} = 40 \text{ €/Std}$

$$c_{schr} = \left(t_{ar} + \Sigma(n_{schr} * t_{ef}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schr}$$

$$c_{schr} = (10 + 2 * 1) * \frac{1Std}{60min} * 40 = 8,00 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 0,62 + 0,90 + 0,04 + 2,34 + 2,15 + 3,34 + 6,17 + 1,20 + 8,00 = \underline{24,76 \text{ €}}$$

3.6.2.4 Rechnungsbeispiel 12) Fachwerkknoten

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 4 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{HEA160} = 1075 \text{ cm}^3; V_{HEA240} = 3648 \text{ cm}^3; V_{HEA360} = 18590 \text{ cm}^3; A_{Bl} = 847 \text{ cm}^2; \\ t_{Bl} = 1,2 \text{ cm}; V_{Naht} = 74,0 \text{ cm}^3; k_{Mat,Pr} = 0,65 \text{ €/kg}; k_{Mat,Naht} = 1,37 \text{ €/kg}; \\ k_{Mat,Bl} = 0,65 \text{ €/kg}; f_{AN} = 1,22; f_{vs} = 1,2$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \varrho) * k_{Mat,Pr} = (1075 + 3648 + 18590) * 0,00785 * 0,65 = 118,95 \text{ €}$$

$$c_{Bl} = A_{Bl} * t_{Bl} * f_{vs} * \varrho * k_{Mat,Bl} = 847 * 1 * 1,2 * 0,00785 * 0,65 = 6,22 \text{ €}$$

$$c_{Naht} = \Sigma(V_{Naht} * f_{AN}) * \varrho * k_{Mat,Naht} = (50,2 * 1,22 + 23,8 * 1,1) * 1,22 * 0,00785 * 1,37 \\ c_{Naht} = 0,94 \text{ €}$$

$$c_s = 0 \text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit dem Bohr-Säge-Automaten bearbeitet

$$l = 5; k_{Betr,BS} = 60 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 4 \text{ min}; t_{nsä} = 1 \text{ min}; v_{schn} = 4,0 \text{ cm/min}$$

$$s_{schn,HEA160} = 15,2 \text{ cm}; s_{schn,HEA240} = 23 \text{ cm}; s_{schn,HEA360} = 0 \text{ cm};$$

$$c_{BS} = \left(3 * \frac{t_{Tr}}{l} + 3 * t_{nsä} + \frac{s_{schn,HEA160} + s_{schn,HEA240} + s_{schn,HEA360}}{v_{schn}} \right) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * k_{Betr,BS}$$

$$c_{BS} = \left(3 * \frac{10}{30} + 3 * 1 + \frac{15,2 + 23 + 0}{4,0} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 13,15 \text{ €}$$

$$A_{BT} = 45000 \text{ cm}^2 (1,5 * 3 \text{ m}); f_{vs} = 1,2; A_{Bl} = 847 \text{ cm}^2$$

$$l_{BT} = \frac{A_{BT} * 0,9}{A_{Bl} * f_{vs}} = \frac{45000 * 0,9}{847 * 1,2} = 40$$

$$k_{Betr,pl} = 60 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 25 \text{ min}; t_{npl} = 1 \text{ min}; v_{schn} = 104 \text{ cm/min}; s_{schn} = 188 \text{ cm}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{t_{Tr}}{l_{BT}} + t_{npl} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} \right) * \frac{1 \text{ Std}}{60 \text{ min}} * k_{Betr,pl}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{25}{40} + 1 + \frac{188}{104} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 4,24 \text{ €}$$

$l = 5; n_{ht} = 3; k_{Betr,ZB} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; t_{nzb} = 10 \text{ min}; t_{hzb} = 5 \text{ min}$

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Zb}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{10}{5} + 3 * (10 + 5) \right) * \frac{1}{60} * 30 = 23,50 \text{ €}$$

$f_{nz} = 1,2; k_{Betr.} = 30 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 10 \text{ min}; l = 5; t_{nschw} = 10 \text{ min};$

$s_{Naht,a4} = 313,6 \text{ cm}; s_{Naht,a6} = 6,6 \text{ cm}; v_{schw,a4} = 32 \text{ cm/min}; v_{schw,a6} = 25 \text{ cm/min}$

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schw}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{10}{5} + 20 + \left(\frac{313,6}{32} + \frac{66}{25} \right) * 1,2 \right) * \frac{1}{60} * 30 = 18,46 \text{ €}$$

$$c_{schr} = 0 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 118,95 + 6,22 + 1,37 + 0 + 13,15 + 4,24 + 23,50 + 18,46 + 0 = \underline{\underline{118,95 \text{ €}}}$$

3.6.2.5 Rechnungsbeispiel 13) Querkraftanschluss; Detail 1; $V_{Ed}=150 \text{ N}$

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 6 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{Pr,L} = 584 \text{ cm}^3; n_{PrL} = 2; V_{Pr,IPE} = 1242 \text{ cm}^3; n_{schr,1} = 4; n_{schr,2} = 4$$

$$k_{Mat,Pr} = 0,65 \text{ €/kg}; k_{Stk1} = 1,17 \text{ €/kg}; k_{Stk2} = 0,85 \text{ €/kg}$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \rho) * k_{Mat,Pr} = (1242 + 2 * 584) * 0,00785 * 0,65 = 12,29 \text{ €}$$

$$c_{Bl} = 0 \text{ €}$$

$$c_{Naht} = 0 \text{ €}$$

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk}) = 4 * 1,17 + 4 * 0,85 = 8,08 \text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit dem Bohr-Säge-Automat bearbeitet

$l = 2; n_{L1} = 4; n_{L2} = 4; k_{Betr,BS} = 60 \text{ €/Std}; t_{Tr} = 4 \text{ min}; t_{nsä} = 1 \text{ min};$

$t_{hbo} = 0,1 \text{ min}; s_{schn,L} = 10 \text{ cm}; s_{schn,IPE} = 27 \text{ cm}; v_{schn} = 4,0 \text{ cm/min}$

$$c_{BS} = \left(2 * \frac{t_{Tr}}{l} + 3 * t_{nsä} + \frac{s_{schn, IPE} + 2 * s_{schn, L}}{v_{schn}} + 2 * (n_{L1} * t_{hbo} + n_{L1} * t_{hbo}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr, BS}$$

$$c_{BS} = \left(2 * \frac{4}{2} + 3 * 1 + \frac{27 + 2 * 10}{4,0} + 2 * (4 * 0,1 + 4 * 0,1) \right) * \frac{1}{60} * 60 = 20,35 \text{ €}$$

$$c_{Pl} = 0 \text{ €}$$

$$c_{Zb} = 0 \text{ €}$$

$$c_{schw} = 0 \text{ €}$$

$$n_{schr1} = 4; n_{schr2} = 4; t_{ar} = 10 \text{ min}; t_{ef1} = 1 \text{ min}; t_{ef2} = 1 \text{ min}; k_{Betr, schr} = 40 \text{ €/Std}$$

$$c_{schr} = (t_{ar} + \Sigma(n_{schr} * t_{ef})) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr, schr}$$

$$c_{schr} = (10 + 4 * 1 + 4 * 1) * \frac{1}{60} * 40 = 12,00 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 12,29 + 0 + 0 + 8,08 + 20,35 + 0 + 0 + 0 + 12,00 = \underline{52,73 \text{ €}}$$

3.6.2.6 Rechnungsbeispiel 14) Querkraftanschluss; Detail 2; $V_{Ed}=150 \text{ N}$

Geometrische Größen wurden dem Rechnungsbeispiel 7 entnommen:

- Materialkosten

$$V_{Pr} = 1242 \text{ cm}^3; A_{Bl} = 380 \text{ cm}^2; t_{Bl} = 1 \text{ cm}; V_{Naht} = 6,4 \text{ cm}^3; n_{schr} = 4$$

$$k_{Mat, Pr} = 0,65 \text{ €/kg}; k_{Mat, Naht} = 1,37 \text{ €/kg}; k_{Mat, Bl} = 0,65 \text{ €/kg}; f_{AN} = 1,22;$$

$$k_{Stk} = 1,17 \text{ €/kg}; f_{vs} = 2,23$$

$$c_{Pr} = \Sigma(V_{Pr} * \rho) * k_{Mat, Pr} = 1242 * 0,00785 * 0,65 = 6,33 \text{ €}$$

$$c_{Bl} = A_{Bl} * t_{Bl} * f_{vs} * \rho * k_{Mat, Bl} = 380 * 1 * 1,05 * 0,00785 * 0,65 = 2,04 \text{ €}$$

$$c_{Naht} = V_{Naht} * f_{AN} * \rho * k_{Mat, Naht} = 6,4 * 1,22 * 0,00785 * 1,37 = 0,08 \text{ €}$$

$$c_s = \Sigma(n_{schr} * k_{Stk}) = 4 * 2,23 = 8,92 \text{ €}$$

- Produktionskosten

Die Profile werden mit dem Bohr-Säge-Automaten bearbeitet

$l = 2$; $n_L = 4$; $k_{Betr,BS} = 60 \text{ €/Std}$; $t_{Tr} = 4 \text{ min}$; $t_{nsä} = 1 \text{ min}$; $s_{schn} = 27 \text{ cm}$;
 $v_{schn} = 4,0 \text{ cm/min}$

$$c_{BS} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nsä} + \frac{s_{schn}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,BS}$$

$$c_{BS} = \left(\frac{4}{2} + 1 + \frac{27}{4,0} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 9,75 \text{ €}$$

$A_{BT} = 45000 \text{ cm}^2$ ($1,5 * 3 \text{ m}$); $f_{vs} = 1,05$; $A_{Bl} = 380 \text{ cm}^2$

$$l_{BT} = \frac{A_{BT} * 0,9}{A_{Bl} * f_{vs}} = \frac{45000 * 0,9}{380 * 1,05} = 101$$

$n_{Lö} = 4$; $k_{Betr,pl} = 60 \text{ €/Std}$; $t_{Tr} = 25 \text{ min}$; $t_{npl} = 1 \text{ min}$; $t_{upl} = 0,8 \text{ min}$; $U_{lö} = 8,2 \text{ cm}$;
 $s_{schn} = 78 \text{ cm}$; $v_{schn} = 104 \text{ cm/min}$

$$c_{Pl} = \left(\frac{t_{Tr}}{l_{BT}} + t_{npl} + t_{upl} * n_{Lö} + \frac{s_{schn} + n_{Lö} * U_{lö}}{v_{schn}} \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,pl}$$

$$c_{Pl} = \left(\frac{25}{101} + 1 + 0,8 * 4 + \frac{78 + 2 * 8,6}{104} \right) * \frac{1}{60} * 60 = 5,51 \text{ €}$$

$l = 2$; $n_{ht} = 1$; $k_{Betr,ZB} = 30 \text{ €/Std}$; $t_{Tr} = 4 \text{ min}$; $t_{nzb} = 3 \text{ min}$; $t_{hzb} = 1 \text{ min}$
 $t_{schl} = 10 \text{ min}$

$$c_{Zb} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + n_{ht} * (t_{nzb} + t_{hzb}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,Zb}$$

$$c_{Zb} = \left(\frac{4}{2} + 1 * (3 + 1) \right) * \frac{1}{60} * 30 = 3,00 \text{ €}$$

$f_{nz} = 1,2$; $k_{Betr.} = 30 \text{ €/Std}$; $t_{Tr} = 10 \text{ min}$; $l = 2$; $t_{nschw} = 1 \text{ min}$; $s_{Naht} = 40,0 \text{ cm}$;
 $v_{schw} = 32 \text{ cm/min}$

$$c_{schw} = \left(\frac{t_{Tr}}{l} + t_{nschw} + \Sigma \left(\frac{s_{Naht} * f_{nz}}{v_{schw}} \right) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schw}$$

$$c_{schw} = \left(\frac{10}{2} + 1 + \frac{40 * 1,2}{32} \right) * \frac{1}{60} * 30 = 3,75 \text{ €}$$

$$n_{schr} = 4; t_{ar} = 10 \text{ min}; t_{ef} = 1 \text{ min}; k_{Betr.} = 40 \text{ €/Std}$$

$$c_{schr} = \left(t_{ar} + \Sigma(n_{schr} * t_{ef}) \right) * \frac{1Std}{60min} * k_{Betr,schr}$$

$$c_{schr} = (10 + 4 * 1) * \frac{1Std}{60min} * 40 = 9,33 \text{ €}$$

- Gesamtkosten

$$c_{Gesamt} = c_{Pr} + c_{Bl} + c_{Naht} + c_s + c_{BS} + c_{Pl} + c_{Zb} + c_{schw} + c_{schr}$$

$$c_{Gesamt} = 6,33 + 2,04 + 0,08 + 8,92 + 9,75 + 5,51 + 3,00 + 3,75 + 9,33 = \underline{48,72 \text{ €}}$$

4 Übersicht der Varianten

4.1 Geometrische Größen der untersuchten Varianten

Tabelle 18: Übersicht der Varianten des Details Druckrohranschluss

Var.- Nr.	Variable 1 Detailausbildung	Variable 2 Druckkraft [kN]	Variable 3 Blech- Material	Schrauben ¹	Naht- dicke [mm]	Naht- länge [cm]	Naht- volumen [cm ³]	Volumen Rohr ² [cm ³]	Volumen T-Profil [cm ³]	Fläche Blech [cm ²]	Umfang Blech [cm]	Umfang Löcher ³ [cm]
1	T-Profil-Anschluss	180	n.v.	M20-4.6	3	28	2,51	90,9	250,8	n.v.	n.v.	n.r.
2	T-Profil-Anschluss	140	n.v.	M16-10.9	3	28	2,51	90,9	209,0	n.v.	n.v.	n.r.
3	T-Profil-Anschluss	100	n.v.	M16-4.6	3	28	2,51	90,9	209,0	n.v.	n.v.	n.r.
4	Konturblech	180	S235	M24-4.6	3	36	3,24	101,6	n.v.	215	87	8,2
5	Konturblech	180	S355	M16-10.9	3	28	2,52	112,3	n.v.	168	75	5,6
6	Konturblech	140	S235	M20-4.6	3	30	2,7	112,3	n.v.	149,5	74	6,9
7	Konturblech	140	S355	M16-4.6	3	30	2,7	128,4	n.v.	101,5	67	5,6
8	Konturblech	100	S235	M16-4.6	3	20	1,8	128,4	n.v.	91,5	57	5,6
9	Konturblech	100	S355	M16-4.6	3	20	1,8	128,4	n.v.	91,5	57	5,6
10	geschlitztes Rohr	180	S235	M24-4.6	3	40	3,6	117,7	n.v.	245,0	63	8,2
11	geschlitztes Rohr	180	S355	M16-10.9	3	40	3,6	128,4	n.v.	170,0	53	5,6
12	geschlitztes Rohr	140	S235	M20-4.6	3	30	2,7	123,0	n.v.	168,0	52	6,9
13	geschlitztes Rohr	140	S355	M16-10.9	3	30	2,7	128,4	n.v.	143,0	48	5,6
14	geschlitztes Rohr	100	S235	M16-4.6	3	20	1,8	128,4	n.v.	121,0	44	5,6
15	geschlitztes Rohr	100	S355	M16-4.6	3	20	1,8	128,4	n.v.	121,0	44	5,6

¹ Die Schraubenanzahl beträgt zwei je Variante;
² Das Volumen des Rohrprofils wird gemessen von der Achse der Schraubenverbindung bis zu einem Abstand von 15 cm;
³ Der Lochumfang ist nur angegeben für Löcher, die mittels Plasmaschnitt hergestellt werden. Bei gebohrten Löcher ist diese Angabe nicht relevant (n.r.)
n.v. ≙ nicht vorhanden

Tabelle 19: Übersicht der Varianten des Details Fachwerkknoten

Var.- Nr.	Variable 1 Normalkraft ¹ [kN]	Variable 2 Detail- ausbildung ²	Variable 3 Blech- Material	Nahtlänge [cm]			Naht- volumen [cm³]	Volumen ³ [cm³]			Fläche Blech [cm²]	Umfang Blech [cm]
				a= 4 mm	a= 5 mm	a= 6 mm		S1	S2	S3; S4		
1	F1=700; F2=495	S2 direkt	S235	314	n.v.	66	74	1075	3648	18590	847	188
2	F1=700; F2=495	S2 direkt	S355	200	68	56	69	1102	3648	18590	571	148
3	F1=600; F2=424	S2 direkt	S235	394	n.v.	60	69	1102	3648	18590	678	169
4	F1=600; F2=424	S2 direkt	S355	196	58	18	64	1102	3648	18590	479	134
5	F1=500; F2=353	S2 direkt	S235	271	n.v.	54	65	1102	3648	18590	555	149
6	F1=500; F2=353	S2 direkt	S355	194	50	48	61	1102	3648	18590	448	125
7	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S235	316	n.v.	n.v.	51	1075	2496	18590	1489	288
8	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S355	48	192	n.v.	50	1090	2419	18590	1114	230
9	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S235	286	n.v.	n.v.	67	1102	2572	18590	1240	263
10	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S355	119	100	n.v.	44	1102	2534	18590	950	212
11	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S235	249	n.v.	n.v.	40	1102	2573	18590	1052	234
12	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S355	115	86	n.v.	41	1102	2496	18590	901	198
¹ F1 ≙ Zug ; F2 ≙ Druck ; F3 = 2800 kN ≙ Zug ; F4 ergibt sich aus der geometrischen Addition der anderen Kräfte ² Bei indirekten Anschluss werden die Kräfte mittels eines Knotenbleches übertragen ³ Das Volumen der Profile wird gemessen von dem Systemachsenschnittpunkt bis zu einem Abstand von 15 cm; n.v. ≙ nicht vorhanden												

Tabelle 20: Übersicht der Varianten des Details Querkraftanschluss

Var.- Nr.	Variable 1 Querkraft [kN]	Variable 2 Detail- ausbildung	Variable 3 Blech- Material	Schrauben		Naht- länge [cm]	Naht- volumen [cm³]	Winkel-/ Blechtyp	Volumen Profile [cm³]		Fläche Blech [cm²]	Umfang Blech [cm]	Umfang Löcher² [cm]
				Typ	Anzahl				IPE¹	L			
1	150 kN	Doppelwinkel	n.v.	M20-4.6 M16-4.6	4 4	n.v.	n.v.	L 200*100*10	1242	584	n.v.	n.v.	n.r.
2	100 kN	Doppelwinkel	n.v.	M20-4.6 M12-4.6	2 4	n.v.	n.v.	L 100*75*7	1242	202	n.v.	n.v.	n.r.
3	70 kN	Doppelwinkel	n.v.	M16-4.6 M12-4.6	2 4	n.v.	n.v.	L 100*75*7	1242	167	n.v.	n.v.	n.r.
4	150 kN	Fahnenblech	S355	M24-4.6	4	40	6,4	Bl 10	1242	n.v.	380	78	8,2
5	100 kN	Fahnenblech	S235	M20-4.6	4	32	5,2	Bl 8	1242	n.v.	272	66	6,9
6	70 kN	Fahnenblech	S355	M16-4.6	4	28	4,5	Bl 8	1242	n.v.	224	60	5,6
7	150 kN	Stirnplatte	S235	M16-4.6	4	30	4,8	Bl 8	1297	n.v.	240	62	5,6
8	100 kN	Stirnplatte	S355	M12-4.6	4	24	3,8	Bl 8	1297	n.v.	168	52	4,4
9	70 kN	Stirnplatte	S235	M12-4.6	2	12	1,9	Bl 8	1297	n.v.	90	42	4,4
¹ Das Volumen des I-Profiles wird gemessen von der Schwerachse Anschlussträgers bis zu einem Abstand von 30 cm; ² Der Lochumfang ist nur angegeben für Löcher, die mittels Plasmaschnitt hergestellt werden. Bei gebohrten Löcher ist diese Angabe nicht relevant (n.r.) n.v. ≙ nicht vorhanden													

4.2 Kostenermittlung der untersuchten Varianten

Tabelle 21: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Druckrohranschluss

Var.- Nr.	Variable 1 Detailausbildung	Variable 2 Druckkraft [kN]	Variable 3 Blech- Material	Fertigungskosten						Gesamt- kosten [€]
				Material- kosten [€]	Profilbear- beitung [€]	Blechher- stellung [€]	Zusam- menbau [€]	Schweißen [€]	Schrauben [€]	
1	T-Profil-Anschluss	180	n.v.	4,12	6,11	n.v.	1,17	1,16	8,00	20,55
2	T-Profil-Anschluss	140	n.v.	4,18	6,36	n.v.	2,15	1,16	9,33	22,10
3	T-Profil-Anschluss	100	n.v.	3,26	6,36	n.v.	2,15	1,16	8,00	19,95
4	Konturblech	180	S235	6,34	2,15	3,75	2,15	1,30	8,00	22,71
5	Konturblech	180	S355	4,57	2,15	3,55	2,15	1,16	8,00	20,60
6	Konturblech	140	S235	3,86	2,15	3,55	2,15	1,20	8,00	19,93
7	Konturblech	140	S355	4,12	2,15	3,42	2,15	1,20	8,00	20,07
8	Konturblech	100	S235	2,94	2,15	3,32	2,15	1,02	8,00	18,60
9	Konturblech	100	S355	4,03	2,15	3,32	2,15	1,02	8,00	19,69
10	geschlitztes Rohr	180	S235	6,42	2,15	3,52	6,17	1,37	8,00	27,63
11	geschlitztes Rohr	180	S355	4,51	2,15	3,33	6,17	1,37	9,33	26,87
12	geschlitztes Rohr	140	S235	3,90	2,15	3,34	6,17	1,20	8,00	24,76
13	geschlitztes Rohr	140	S355	4,31	2,15	3,26	6,17	1,20	9,33	26,42
14	geschlitztes Rohr	100	S235	3,03	2,15	3,21	6,17	1,05	8,00	23,61
15	geschlitztes Rohr	100	S355	3,23	2,15	3,21	6,17	1,05	8,00	23,81

Tabelle 22: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Fachwerkknoten

Var.- Nr.	Variable 1 Normalkraft ¹ [kN]	Variable 2 Detail- ausbil- dung ²	Variable 3 Blech- Material	Fertigungskosten						Gesamt- kosten [€]
				Material- kosten [€]	Profilbear- beitung [€]	Blegher- stellung [€]	Zusam- menbau [€]	Schweißen [€]	Schrauben [€]	
1	F1=700; F2=495	S2 direkt	S235	126,11	13,15	4,24	23,5	18,46	n.v.	185,47
2	F1=700; F2=495	S2 direkt	S355	125,46	13,15	3,65	23,5	17,54	n.v.	183,30
3	F1=600; F2=424	S2 direkt	S235	124,95	13,15	3,93	23,5	17,94	n.v.	183,47
4	F1=600; F2=424	S2 direkt	S355	124,37	13,15	3,44	23,5	16,34	n.v.	180,81
5	F1=500; F2=353	S2 direkt	S235	123,97	13,15	3,65	23,5	17,38	n.v.	181,64
6	F1=500; F2=353	S2 direkt	S355	124,17	13,15	3,34	23,5	16,85	n.v.	181,01
7	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S235	125,59	13,15	6,76	23,5	16,93	n.v.	185,93
8	F1=700; F2=495	S2 indirekt	S355	125,08	13,15	5,91	23,5	16,01	n.v.	183,66
9	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S235	124,07	13,15	6,32	23,5	16,36	n.v.	183,41
10	F1=600; F2=424	S2 indirekt	S355	123,87	13,15	5,60	23,5	15,37	n.v.	181,50
11	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S235	122,50	13,15	5,90	23,5	15,67	n.v.	180,72
12	F1=500; F2=353	S2 indirekt	S355	123,12	13,15	5,43	23,5	15,00	n.v.	180,20

¹ F1 ≙ Zug; F2 ≙ Druck; F3 = 2800 kN ≙ Zug; F4 ergibt sich aus der geometrischen Addition der anderen Kräfte

Tabelle 23: Ermittlung der Gesamtkosten der Varianten des Details Querkraftanschluss

Var.- Nr.	Variable 1 Querkraft [kN]	Variable 2 Detail- ausbildung	Variable 3 Blech- Material	Fertigungskosten						Gesamt- kosten [€]
				Material- kosten [€]	Profilbear- beitung [€]	Blechher- stellung [€]	Zusam- menbau [€]	Schweißen [€]	Schrauben [€]	
1	150 kN	Doppelwinkel	n.v.	20,38	20,35	n.v.	n.v.	n.v.	12	52,73
2	100 kN	Doppelwinkel	n.v.	12,86	18,7	n.v.	n.v.	n.v.	10,67	42,23
3	70 kN	Doppelwinkel	n.v.	12,26	18,7	n.v.	n.v.	n.v.	10,67	41,63
4	150 kN	Fahnenblech	S355	17,38	9,75	5,51	3,00	3,75	9,33	48,72
5	100 kN	Fahnenblech	S235	12,25	9,75	5,27	3,00	3,60	9,33	43,21
6	70 kN	Fahnenblech	S355	10,76	9,75	5,13	3,00	3,53	9,33	41,50
7	150 kN	Stirnplatte	S235	11,11	9,75	5,16	4,00	3,56	9,33	42,92
8	100 kN	Stirnplatte	S355	9,51	9,75	4,98	4,00	3,45	9,33	41,01
9	70 kN	Stirnplatte	S235	8,09	9,75	3,15	4,00	3,23	8,00	36,21
¹ F1 ≙ Zug; F2 ≙ Druck; F3 = 2800 kN ≙ Zug; F4 ergibt sich aus der geometrischen Addition der anderen Kräfte										

5 Vergleich der Varianten

5.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 4 zusammengestellten Daten analysiert. Dazu ist eine Betrachtung der Aussagefähigkeit der erstellten Datensätze erforderlich. Im Abschnitt 5.2 wird die Genauigkeit der Gesamtkosten mit den zur Berechnung herangezogenen Werten verglichen, um festzustellen, welche Deutungen bei einem Vergleich zulässig sind.

Die Analyse der Varianten erfolgt mithilfe eines Diagramms. Dabei ist der Grundaufbau für jedes Detail gleich: Die Abszisse bildet die Variable der einwirkenden Kraft, auf der Ordinate werden die Gesamtkosten abgetragen. Aus den Kombinationen der restlichen Variablen werden die Graphen gebildet.

Zu erwarten ist ein, zu den größeren einwirkenden Kräften stetig steigender Verlauf der Graphen. Dabei sollten die Differenzen der Gesamtkosten mit denen der einwirkenden Kräfte annähernd proportional sein. Bei größeren Abweichungen von der erwarteten Form der Graphen ist eine Analyse über die möglichen Ursachen vorzunehmen.

Der Vergleich der Varianten erfolgt im Abschnitt 5.3 für den Druckrohranschluss, im Abschnitt 5.4 für den Fachwerkknoten und im Abschnitt 5.5 für den Querkraftanschluss.

5.2 Einschätzung der Aussagefähigkeit

Die Berechnung und Angabe der Gesamtkosten ist jeweils im Cent-Bereich abgegeben. Bei der Betrachtung der Fertigungszeiten und Betriebskosten handelt es sich um stark gerundete, teilweise auf einer Schätzung basierende Werte. Dem entsprechend liegen die realen Fertigungskosten in einem Bereich um die berechneten Werte. Varianten, deren Kostendifferenz die 1-Euro-Marke nicht überschreiten können als wirtschaftlich gleichwertig betrachtet werden. Bei geringen Differenzen sind eventuell Tendenzen erkennbar. Kostendifferenzen, die diese Marke überschreiten, werden als Aussagekräftig gewertet.

5.3 Druckrohranschluss

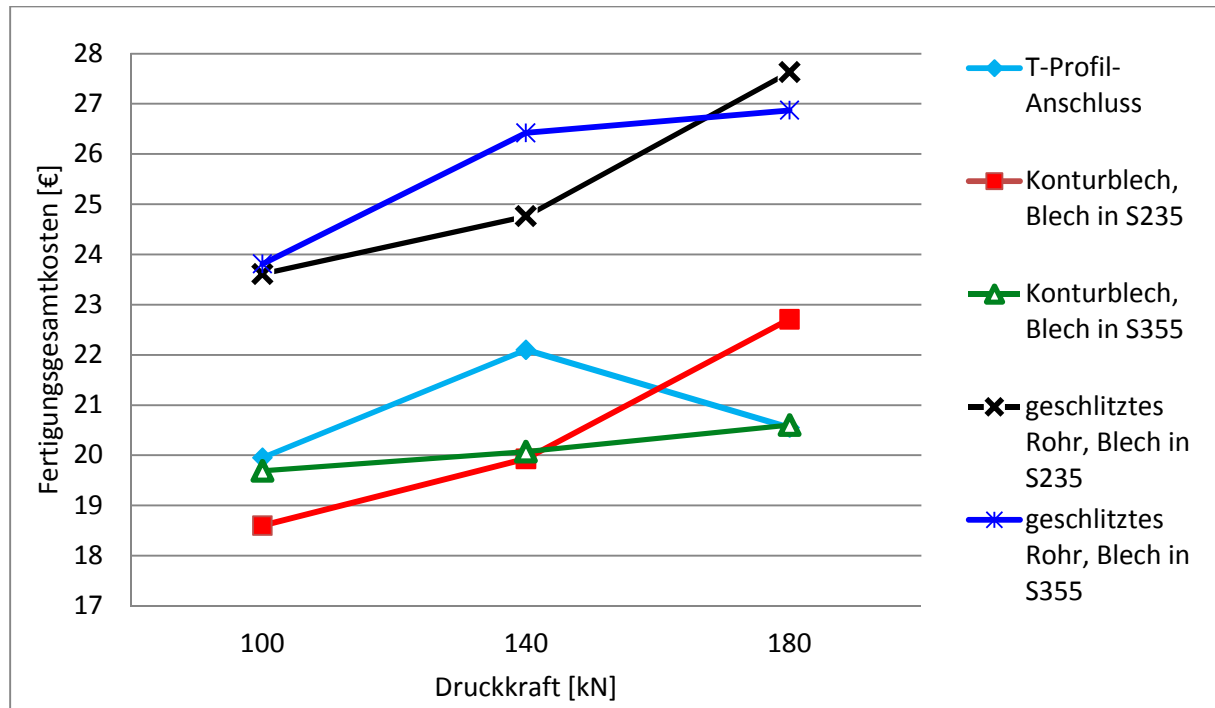


Abbildung 48: Vergleich der Fertigungskosten des Details Druckrohr

In der Abbildung 48 ist deutlich ersichtlich, dass die Varianten mit geschlitztem Rohr mit dem höchsten Kostenaufwand zu fertigen sind. Der ausschlaggebende Faktor ist hierbei der hohe Zeitaufwand beim Schlitzten des Rohres. Eine Verringerung des Kostenaufwands kann durch den Einsatz von Spezialmaschinen erzielt werden.

Auffällig ist, dass die Kosten innerhalb einer Variante nicht annähernd linear mit steigender Kraft ansteigen, sondern teilweise stark abweichen. Am deutlichsten ist dies bei dem T-Profil-Anschluss zu erkennen, dort ist die 140 kN Variante am kostenintensivsten. Eine Ursache liegt darin, dass bei der betrachteten Variante die geringeren Abmessungen und die daraus resultierende Materialersparnis zur Notwendigkeit führte, HV-Schrauben einzusetzen, um den Nachweis auf Lochlaibung zu erfüllen. In diesem Fall wäre die 140 kN Variante zu verwerfen und die 180 kN Variante zu bevorzugen.

Im Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Blechmaterial ist zu erkennen, dass bei 100 kN Druckkraft die Bleche aus S235 und bei 140 kN die Bleche aus S355 wirtschaftlicher sind. Dies folgt aus der Tatsache der höheren Festigkeit und Materialkosten des S355. Bei geringeren Kräften werden die Abmessungen der Bleche durch konstruktive Vorgaben beschränkt, wie beispielsweise minimale Rand- und Lochabstände. Dadurch ist der Materialpreis der ausschlaggebende Faktor. Erhöht sich die Druckkraft werden die Abmessungen von der Bauteilspannung vorgegeben; bei dem S355 ist die benötigte Querschnittsfläche geringer, da das Material eine höhere zulässige Spannung besitzt. Die daraus folgende Materialersparnis übersteigt die Mehrkosten des S355.

5.4 Fachwerkknoten

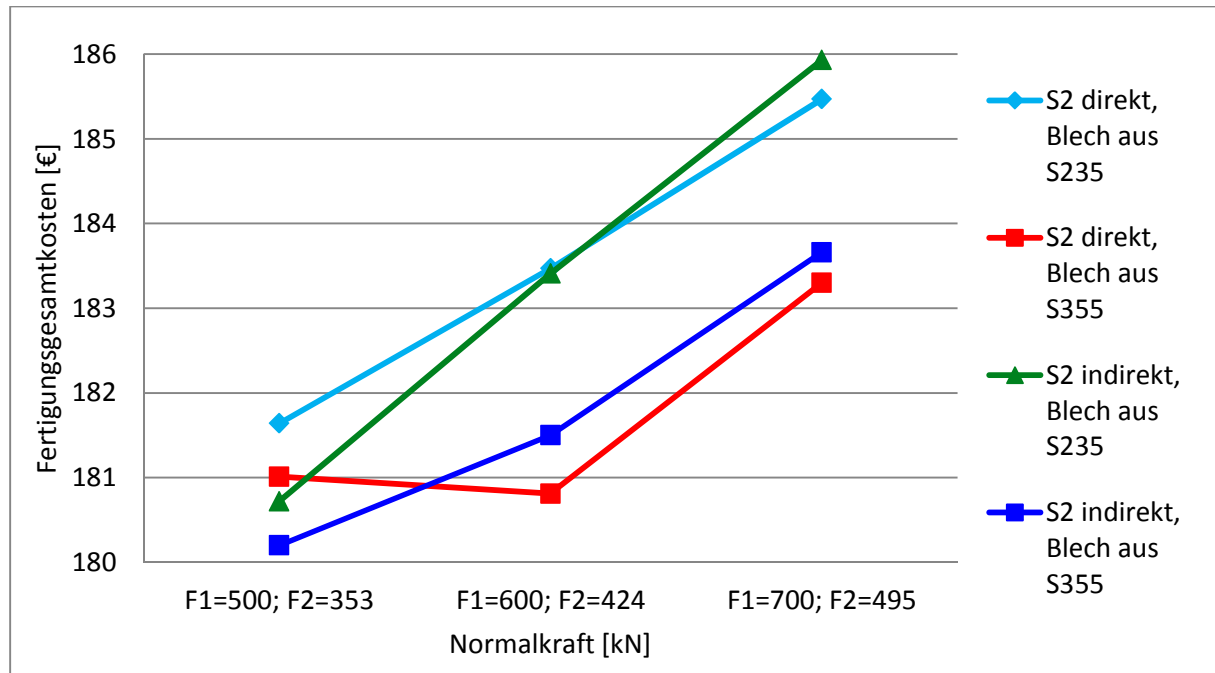


Abbildung 49: Vergleich der Fertigungskosten des Details Fachwerkknoten

In der Abbildung 49 ist ersichtlich, dass die Varianten mit dem Knotenblech aus S355 am kostengünstigsten sind. Dies lässt sich, ähnlich wie beim Druckrohranschluss, auf die Materialersparnis durch die geringere benötigte Querschnittsfläche zurückführen. Eine Ausnahme bildet die Variante „S2 direkt, Blech aus S235“ bei den Normalkräften $F_1 = 500 \text{ kN}$; $F_2 = 353 \text{ kN}$. Dort führten die geringeren Abmessungen zu kürzeren Nähten, die, um die entsprechenden Kräfte übertragen zu können, eine größere Nahtdicke aufweist. Der dadurch entstandene Mehraufwand bei den Schweißarbeiten gleicht die Kostenersparnis durch das geringere Blechvolumen wieder aus.

Bei der Berechnung wurde der Stabilitätsnachweis der Stäbe als erfüllt betrachtet. Dabei besitzt die Ausbildung des Anschlusses einen großen Einfluss auf die kritische Knicklänge des Stabes. Die kritische Knicklänge ist das Produkt aus der Länge des Stabes und einem Beiwert nach Euler¹⁰ (siehe Abbildung 50), mit dem der Nachweis auf Biegeknicken geführt wird. In den Anschlussvarianten, bei denen der Stab S2 direkt an den Gurt der Stäbe S3; S4 geschweißt wird, der Widerstand gegen das Verdrehen der Stabenden höher. Dadurch kann die kritische Knicklänge um 50% verringert werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, bei gleichen Einwirkungen kleinere Trägerquerschnitte zu wählen. Aus diesem Grund ist die direkte Anschlussvariante zu bevorzugen.

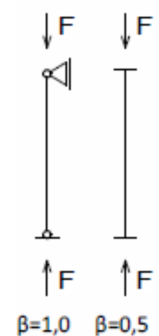


Abbildung 50: Knicklängenbeiwerte nach Euler

¹⁰ (Gloris, 2010) Seite 8.24

5.5 Querkraftanschluss

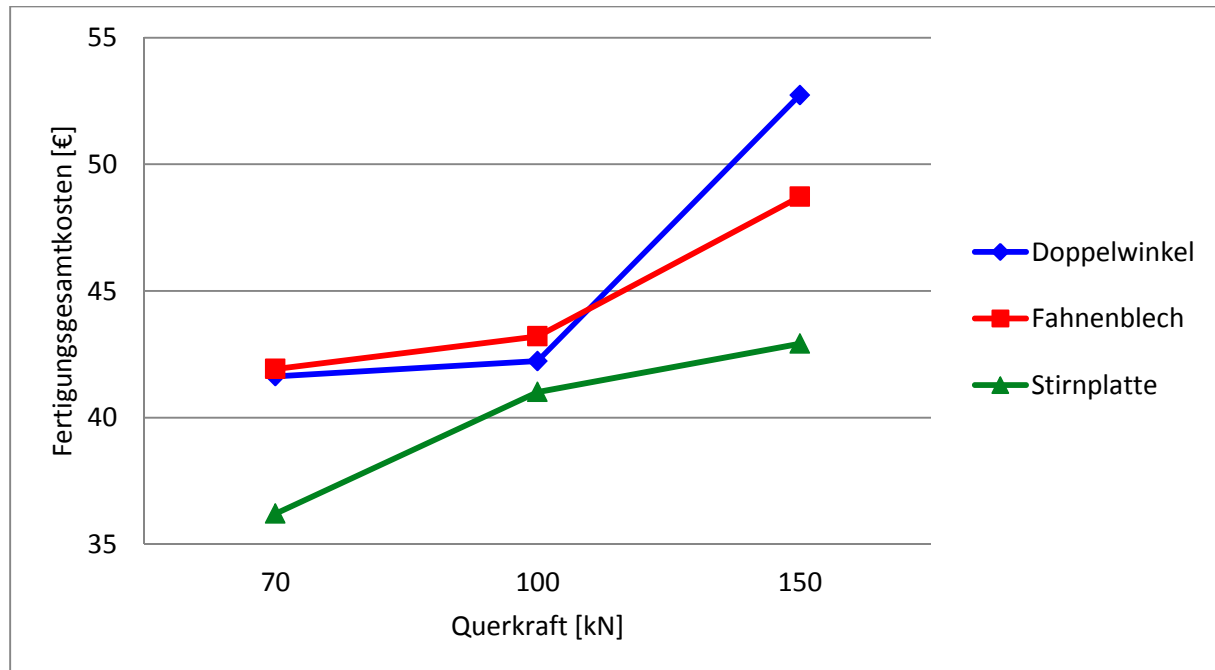


Abbildung 51: Vergleich der Fertigungskosten des Details Querkraftanschluss

In der Abbildung 51 ist erkennbar, dass der Stirnplattenanschluss mit dem geringsten Kostenaufwand zu fertigen ist. Dies liegt in den kompakteren Abmessungen, die durch das Fehlen des Anschlussmomentes gegenüber den anderen Varianten begründet ist. Der begrenzende Faktor bei der Übertragung des Anschlussmomentes ist in den betrachteten Varianten der Steg des IPE-Profils. Um die Lochlaibung des Stegs nicht zu überschreiten, vergrößert sich das Schraubenbild mit steigender Querkraft. Daraus ergibt sich in der Theorie ein treppenförmiger Verlauf der Linie mit gering steigenden Abschnitten, in denen sich die Abmessungen ändern und stark steigenden Abschnitten, bei denen sich die Schraubenanzahl zusätzlich erhöht. Analoges trifft auf den Stirnplattenanschluss zu. Mit drei Messpunkten je Variante lässt sich dies nur erahnen. In dem betrachteten Bereich steigen die Kosten beim Doppelwinkel- gegenüber dem Stirnplattenanschluss bei 150 kN stärker, aufgrund der Notwendigkeit einer höheren Schraubenanzahl und den damit verbundenen größeren Material- und Montagekosten.

Aus konstruktiver Sicht stellt der Stirnplattenanschluss die höchsten Anforderungen an den Aufbau der Konstruktion. Der notwendige Kontakt mit dem zu verbindenden Bauteil lässt das Ausgleichen der auf der Baustelle unvermeidbaren Abmessungstoleranzen nicht zu. Dies erhöht die Gefahr sich summierender Toleranzen (siehe Abbildung 53). Weiterhin ist das „Hineindreihen“ eines Trägers mit Stirnplattenanschlüssen, wie in Abbildung 52 dargestellt, zwischen den Gurten vorhandener Träger oft nicht möglich.

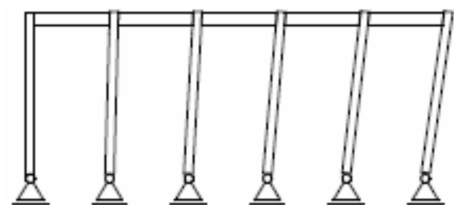


Abbildung 53: Toleranzsummierung durch fehlende Ausgleichsmöglichkeiten

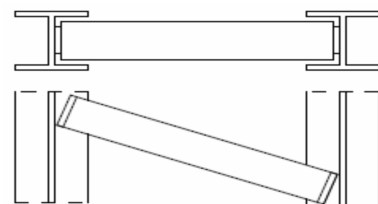


Abbildung 52: Problem beim „Hineindreihen“ eines Trägers

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Varianten ausgewählter Stahlbauanschlüsse nach geltender Norm nachgewiesen. Anhand Maschinen- und Anlagentechnik, wie sie in mittleren und mittelgroßen Stahlbauunternehmen üblich sind, wurde der Fertigungsprozess nachempfunden und darauf basierend eine Kostenanalyse durchgeführt. Durch einen Vergleich konnte die Variante mit dem geringsten Kostenaufwand ermittelt werden. Es zeigte sich zudem, dass eine Reduzierung der Abmessungen nicht immer eine Kostenreduzierung herbeiführt und, dass der Einsatz höherfester Materialien in bestimmten Fällen wirtschaftlich sein kann. Weiterhin wurden Einflüsse auf die Gesamtkosten benannt, sowie konstruktive und statische Aspekte zur Wahl einer Variante aufgezeigt.

Die in dieser Arbeit angegebenen Varianten stellen nur eine mögliche Lösung dar. Durch das iterative Wesen der Nachweisführung sind innerhalb gleicher Rahmenbedingungen Abweichungen der Anschlussabmessungen möglich. Diese Unterschiede beeinflussen den Fertigungsaufwand und dadurch auch die Fertigungskosten. Eine genauere Analyse der Abweichungen innerhalb einer Variante mit dem Ziel, die Fertigungskosten auf ein Minimum zu reduzieren, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In der Praxis wird diese Berechnung nicht vorgenommen, da die zu erwartenden Kostensenkungen in keinem Verhältnis mit dem damit verbundenen enormen Untersuchungsaufwand stehen.

Um die Wertigkeit einer Kostenminderung von Anschlüssen zu ermessen, ist es erforderlich, andere Elemente der Konstruktion zu betrachten. Im Regelfall ist der Kostenaufwand von flächigen und linearen Elementen einer Konstruktion höher als bei punktförmigen Elementen. Die punktförmigen Elemente, wie Anschlüsse oder Aussteifungen, haben einen großen Einfluss auf die Stabilität der anderen Elemente. Wie im Abschnitt 5.4 aufgezeigt wurde, kann die Wahl einer entsprechenden Anschlussvariante die kritische Knicklänge verringern. Der Einsatz einer wirtschaftlichen Anschlussvariante kann das Verstärken eines linearen Bauelementes erforderlich machen, wie beispielsweise dem Erhöhen der Querschnittsfläche durch die Wahl eines größeren Profils oder dem Anbringen (Anschweißen) von Verstärkungsblechen. Dies führt zu einer Steigerung des Kostenaufwands, die im Allgemeinen die Kostenersparnis des Anschlusses deutlich überschreitet. Aus diesem Grund sind vor der Wahl einer Anschlussvariante die Erfordernisse der anderen Elemente zu betrachten. Bei der Tragwerksplanung einer Konstruktion werden die Anschlussbedingungen der zu berechnenden Elemente vorgegeben. In den Anschlussbedingungen sind die Knicklängenbeiwerte der jeweiligen Anschlüsse festgelegt. Das Verwenden einer Anschlussvariante, die einen abweichenden Knicklängenbeiwert besitzt, ist nicht zulässig.

Die in dieser Arbeit verwendeten Materialpreise und Lohnkosten waren zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gültig. Diese Kostenfaktoren unterliegen jedoch Schwankungen. Steigt der Materialpreis an, so können Varianten, wie beispielsweise die Variante „S2 direkt, Blech aus S235“ bei den Normalkräften $F_1 = 500 \text{ kN}$; $F_2 = 353 \text{ kN}$ (vgl. Abbildung 49; Seite 104), die durch den hohen Fertigungsaufwand (hier: das Erstellen der Schweißverbindung) unwirtschaftlich wurden, durch den Preisanstieg die wirtschaftlichsten darstellen. Der Grund dafür ist, dass die Materialersparnis einen höheren Einfluss auf die Gesamtkosten nimmt und der Fertigungsaufwand zunehmend in den Hintergrund tritt. Steigen wiederum die Personalkosten durch beispielsweise neue Tarife, können Varianten, die einem vergleichsweise hohen Anteil an Materialkosten gegenüber den Fertigungskosten aufweisen, die wirtschaftlichste Lösung darstellen. Als Beispiel wäre der Querkraftanschluss mit Doppelwinkel (Abbildung 51; Seite 105) zu nennen. Da die Fertigungsstufen der Blechherstellung an der Plasmaan-

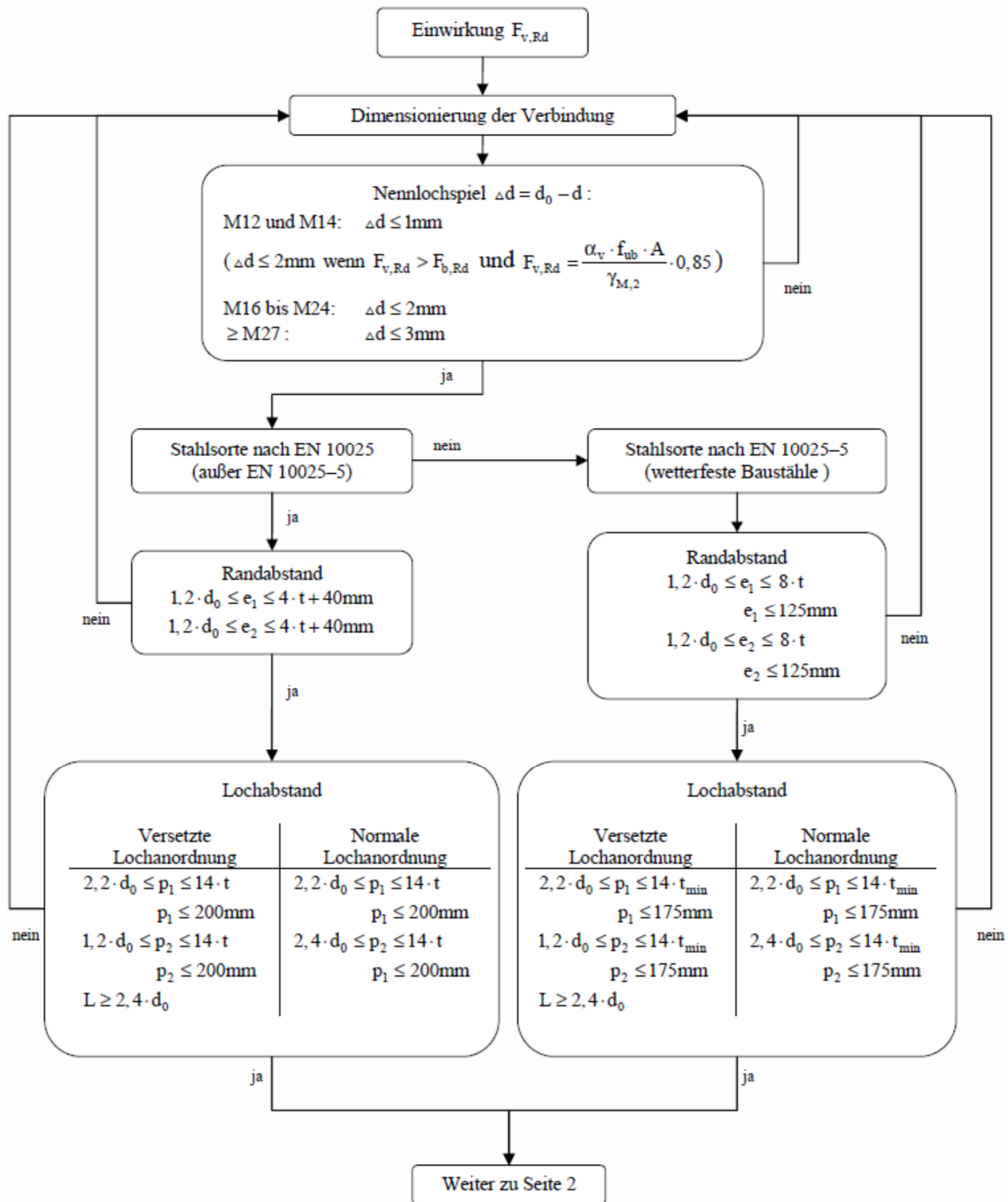
lage, der Zusammenbau und des Schweißplatzes bei der Herstellung der Anschlussvariante entfallen, wirkt eine Betriebskostensteigerung weniger stark auf die Höhe der Gesamtkosten aus, als es bei den anderen betrachteten Varianten der Fall ist.

Durch die Wahl der entsprechenden Varianten können Fertigungskosten im einstelligen Eurobereich je hergestellten Anschluss erzielt werden. In der Gesamtheit des Fertigungsprozesses lassen sich dadurch nennenswerte Kosten einsparen und die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen.

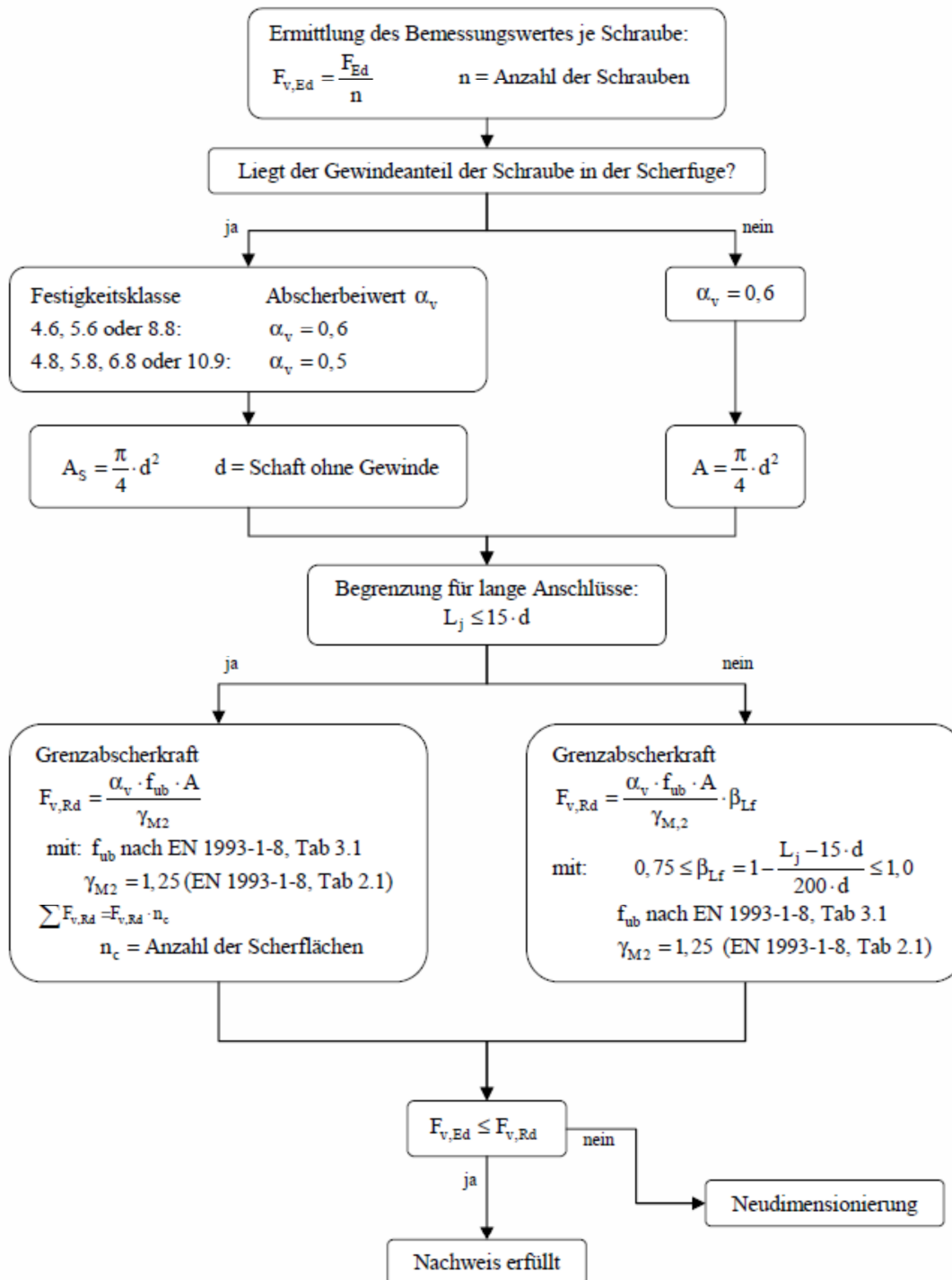
7 Anhang

Auszug aus der Diplomarbeit (Auerswald, 2009):

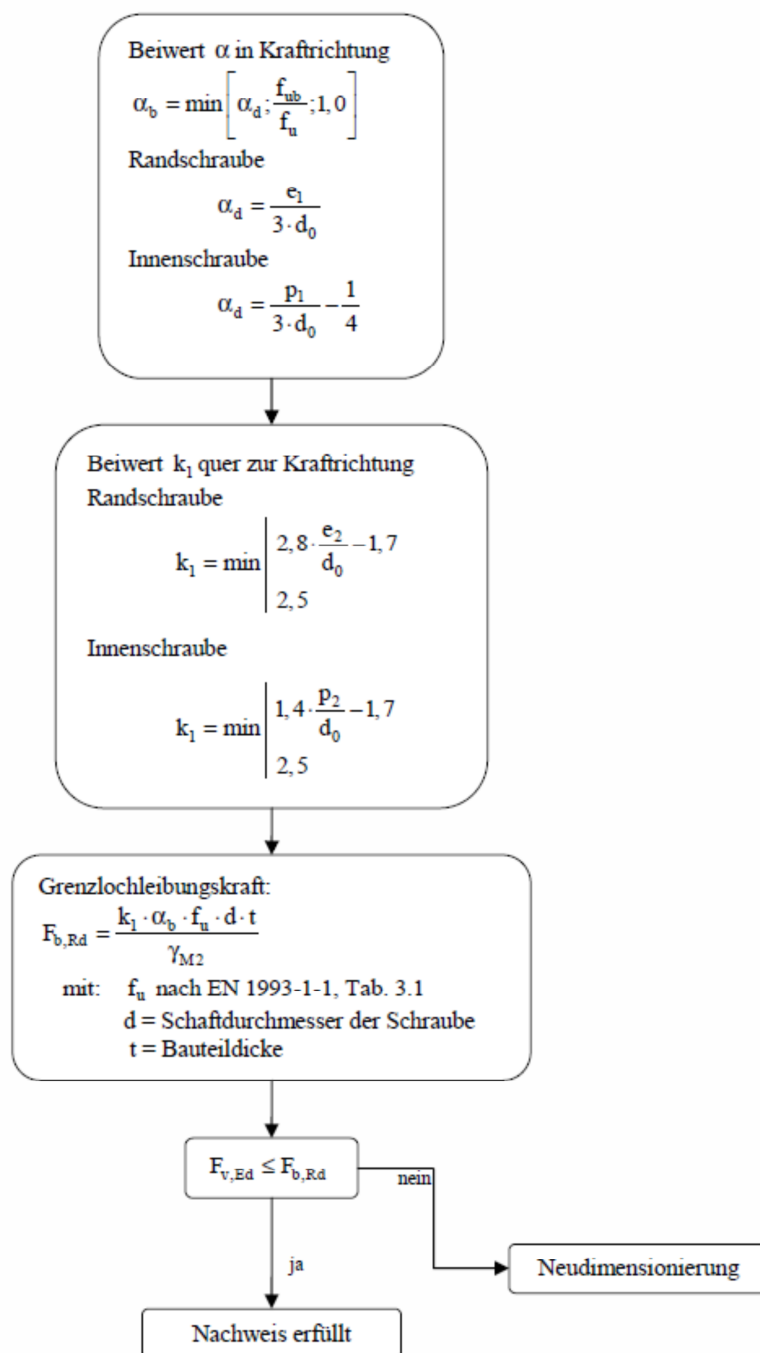
1.4 Nachweisschema für Schraubenverbindungen mit Längs- oder Querkraften nach EN 1993-1-8:2005 (D)



1.5 Nachweisschema auf Abscheren der Schraube nach EN 1993-1-8:2005 (D)



**1.6 Nachweisschema auf Lochleibung des Grundwerkstoffes
nach EN 1993-1-8:2005 (D)**

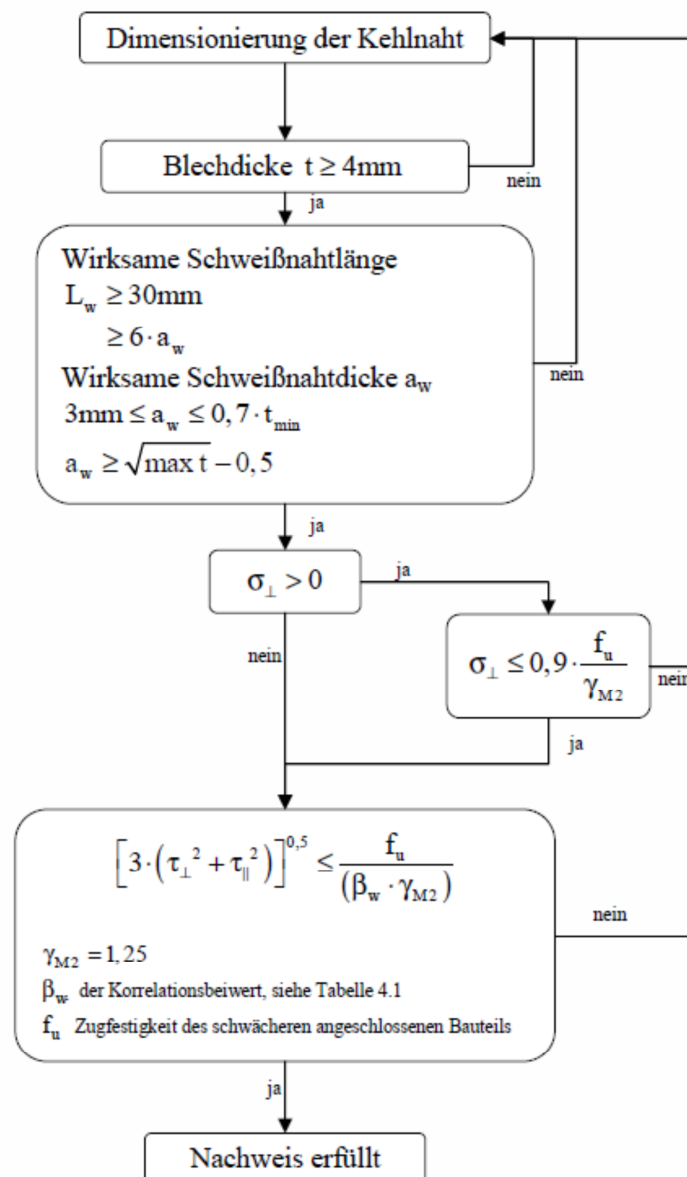


2.3.1 Nachweisschema geschweißter Kehlnahtverbindungen nach EN 1993-1-8:2005

(D) 4.5.3.2 - Richtungsbezogenes Verfahren:

Gültig für:

- durchgeschweißte Kehlnahtverbindungen mit einem Öffnungswinkel der Flanken von 60° bis 120° .
- Bauteildicken von 4mm bis 30mm.
- Überlappte Stöße mit einer Länge von $L_w \leq 150 \cdot a_w$
- mittig angeschlossene Bauteile

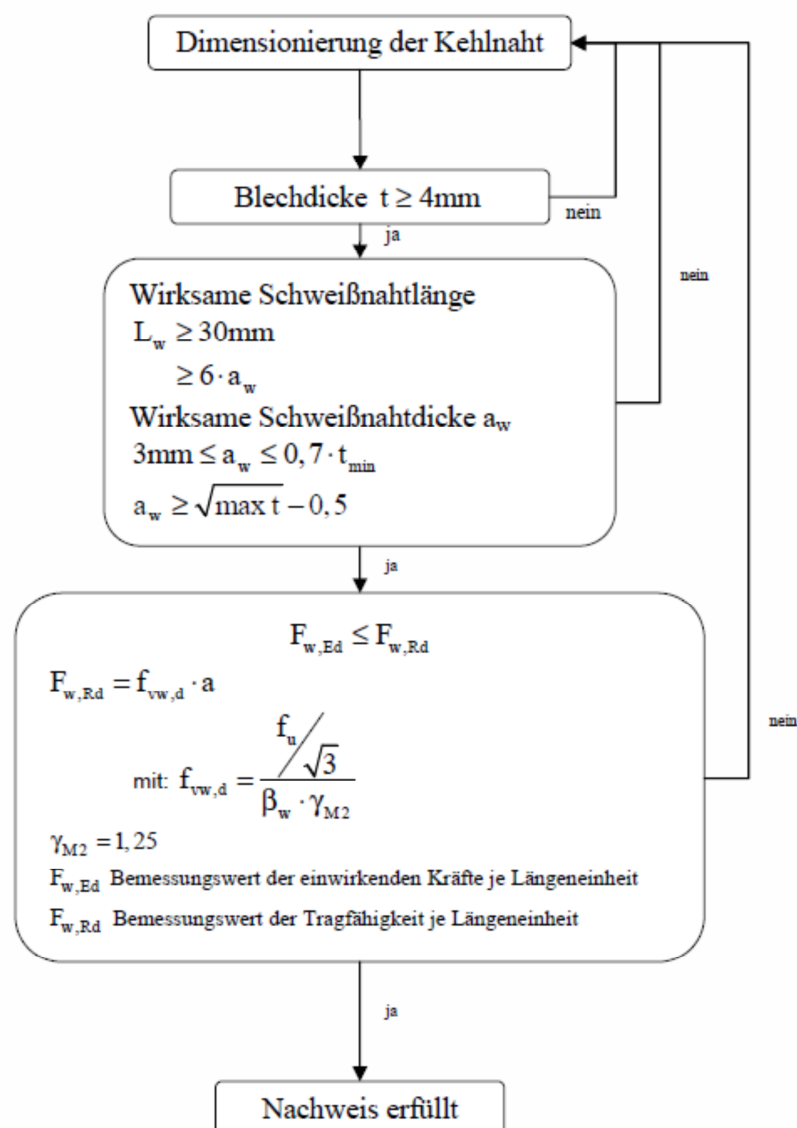


2.3.2 Nachweisschema geschweißter Kehlnahtverbindungen nach EN 1993-1-8:2005

(D) 4.5.3.3 - Vereinfachtes Verfahren:

Gültig für:

- durchgeschweißte Kehlnahtverbindungen mit einem Öffnungswinkel der Flanken von 60° bis 120°
- Bauteildicken von 4mm bis 30mm
- überlappte Stöße mit einer Länge von $L_w \leq 150 \cdot a_w$
- mittig angeschlossene Bauteile



8 Normverzeichnis

DIN EN 1993-01-01 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; 2010-12

DIN EN 1993-01-01NA Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau – Nationaler Anhang Deutschland; 2010-12

DIN EN 1993-01-08 Bemessung von Anschlüssen; 2010-12

DIN EN 1993-01-08NA Bemessung von Anschlüssen – Nationaler Anhang Deutschland; 2010-12

DIN 1025-3 Warmgewalzte I-Träger, Teil 3 Breite I-Träger, leichte Ausführung, IPB-Reihe - Maße, Masse, statische Werte; 1994-03

DIN 1025-5 Warmgewalzte I-Träger, Teil 5 Mittelbreite I-Träger, IPE-Reihe - Maße, Masse, statische Werte, 1994-03

9 Literaturverzeichnis

Auerswald, D. (2009). Vergleich der DIN 18800 und des Eurocode 3 anhand von ausgewählten Beispielen. *Diplomarbeit*. Mittweida.

Gloris, A. (2010). *Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 19. Auflage*. Siegen: Werner Verlag.

Goldhahn, P. D.-I. (2013). Skript des Fachs Grundlagen Produktionsbetrieb; Hochschule Mittweida.

Hübner, P. D.-I. (2013). Skript des Fachs Schweiß- und Fügetechnik. Mittweida: Hochschule Mittweida.

Stahlbau Lüttewitz GmbH – Abteilung Büro

Stahlbau Lüttewitz GmbH – Abteilung Einkauf

Studienunterlagen und Skripte

Ausbildungsunterlagen „SFI“ (Schweißfachingenieur)

10 Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum

Unterschrift